

安息角に対する個別要素法の入力パラメータと粒子形状の影響

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 奥山 大輝
 東北大学大学院工学研究科 学生会員 橘 一光
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. はじめに

土砂流動に有効な解析手法として、離散体モデルに基づく、個別要素法 [1] がある。しかしながら、実際の土砂流動を予測するうえで、入力パラメータや解析条件の設定は簡単なものではなく、現在もなお課題としてあげられる。そこで、本研究では、土砂流動解析に求められる入力パラメータや解析条件のための基礎的な検討として、粒状体を特徴づける安息角を対象に、入力パラメータや用いる要素の形状を変化させ、その影響を調べた。また、それらの解析結果に基づいた安息角のデータベースを作成した。

2. 数値解析手法

要素間の接触力については、線形応答のバネを仮定した線形ヒステリシスモデルを用いた。図-1に要素の1回の接触による接触力の推移の概念図を示す。法線方向の接触力において、2つの要素が近づいていく過程では式 (1) によって接触力の算定が行われ、離れていく過程では式 (2) によって接触力が算定される。このままでは、あるオーバーラップ量で接触力は0になるが、計算の都合上の問題から不安定になるため、オーバーラップ量が0になるまで、極めて0に近いバネ定数を想定した式 (3) を採用する。ここで、 F_n^t は、現在のタイムステップにおける法線方向の接触力であり、 F_n^{t-dt} は1つ前のタイムステップの接触力である。また、 K_{n1} と K_{n2} はそれぞれ、2つの要素が近づいていく過程でのバネ定数と離れていく過程でのバネ定数であり、この2つのバネ定数の関係は、反発係数 e を用いて式 (4) で表される。また、 s_n は現在のタイムステップにおける法線方向の要素の貫入量であり、 ds_n は現在のタイムステップにおける貫入量の増分を意味する。

$$F_n^t = K_{n1} \cdot s_n \quad (1)$$

$$F_n^t = F_n^{t-dt} + K_{n2} \cdot ds_n \quad (2)$$

$$F_n^t = 0.001 \cdot K_{n1} \cdot s_n \quad (3)$$

$$K_{n2} = \frac{K_{n1}}{e^2} \quad (4)$$

接線方向の接触力においてはクーロン摩擦を考慮している。要素に滑りが発生していないときは、式 (5) で接触力が算定され、滑りが発生しているときは式 (6) で接触力が算定される。ここで、 F_t^t は現在のタイムステップにおける

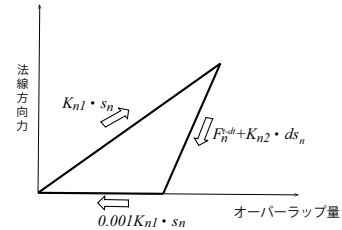


図-1 接触力の概念図

接線方向の接触力である。 μ_s および μ_d は、それぞれ静止摩擦係数と動摩擦係数である。 ds_t は現在のタイムステップにおける接線方向の貫入量の増分を意味する。

$$F_t^t = \min(F_t^{t-dt} + K_{n1} \cdot ds_t, \mu_s \cdot F_n^t) \quad (5)$$

$$F_t^t = \min(F_t^{t-dt} + K_{n1} \cdot ds_t, \mu_d \cdot F_n^t) \quad (6)$$

3. 安息角の実験

本研究では、碎石を用いた安息角の実験を行い、その実験の再現解析を通じて入力パラメータや解析条件の影響を分析する。実験では、直径 150mm、長さ 150mm の円筒の中に、碎石を充填させ、鉛直上向きに準静的に引き抜いたときに形成される円錐の傾斜角を計測する方法で安息角を求めた。

用いた碎石は、表-1に示す粒度分布を有し、土粒子密度は 2.69 g/cm^3 である。安息角の計測方法は、形成された円錐の端から頂点までの傾斜角と θ_1 とし、円錐の端から頂点の 1/2 の高さにあたる地点までの傾斜角を θ_2 とし、計測した。

表-1 碎石の粒度分布

粒径 (mm)	通過質量百分率 (%)	百分率 (%)
19.0	100	40.4
9.5	59.6	59.6
4.75	0	0

3.1 実験結果

先述の計測方法で計測された安息角を表-2に示す。図-2に示すように、実験によって形成された円錐は山の頂点付近で傾斜がほぼ一定となっており、 θ_1 と θ_2 と異なる2方法の取り方によっても角度の違いに大きな差はみられなかった。なお、実験は3回実施し、1回あたり、方向を変えて安息角を4回計測しており、表-2の値はその計測結果の平均値である。

表-2 試験結果

θ_1	θ_2
32.6	34.6



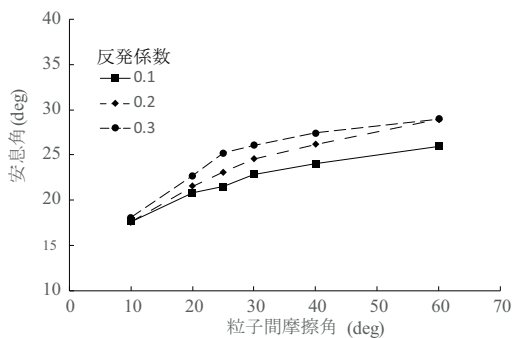
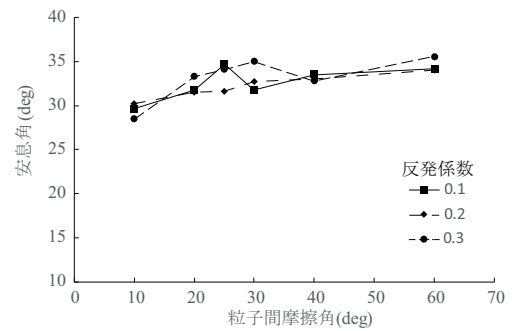
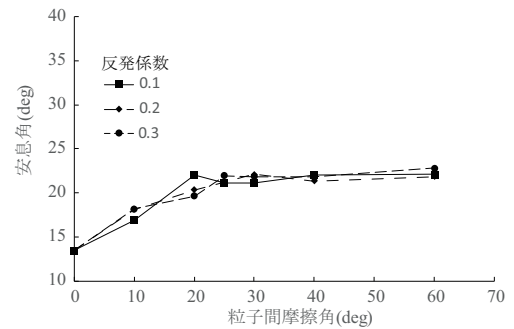
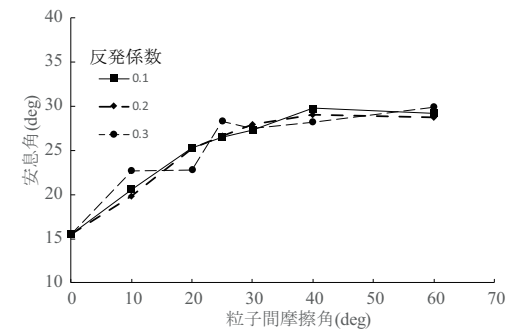
図-2 引抜き後の様子

4. 再現解析

先述の実験に対して、同形状、同寸法の解析モデルを作成し、入力パラメータや粒子形状を変化させて再現解析を行った。ただし、本研究では、粒度分布は考慮せず、粒径は1 cmとして、球要素と多角形要素を用いた。反発係数を0.1, 0.2, 0.3, 粒子間摩擦角を10°, 20°, 25°, 30°, 40°, 60°と変化させて各粒子形状について調べた。また、球要素においては、粒子が、その構造のみで安息角がどの程度になるか検討するため、粒子間摩擦角を0°のケースも追加で実施している。

4.1 解析結果と考察

図-3～6に、多角形要素と球要素のそれぞれについて、解析結果から得られた安息角と粒子間摩擦角の関係を示す。粒子間摩擦角が0°の球要素でも、安息角が θ_1 で約13°, θ_2 で約15°となった。粒子の配列構造だけでもある程度は安息角が出ることがわかる。図-3と図-5を比較すると、形状を非球形にすることにより、安息角は増加し、非球形の場合には、反発係数が高いほうが、より安息角が高くなることが確認できる。なお、粒子間摩擦角を増加させても、安息角の増加には限界があることが確認できる。

図-3 多角形要素の安息角 θ_1 図-4 多角形要素の安息角 θ_2 図-5 球要素の安息角 θ_1 図-6 球要素の安息角 θ_2

5. まとめ

今回の実験および再現解析を通して、次のことが結論付けられる。

- 粒子間摩擦を増加させても安息角の増加は、ある一定値で増加が頭打ちになる。
- 非球要素では、球要素と比べて、粒子間摩擦や反発係数などのパラメータによる安息角の変化が顕著である。

本研究では、球要素と多角形要素について反発係数と粒子間摩擦を変化させて実施したが、パラメータの変化による安息角への寄与も要素特性によって異なる。そのため、様々な要素において、図-3～6のようなデータベースを作成し、安息角に対する情報を整理しておくことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack O.D.L: A discrete numerical model for granular materia, Geotechnique, 29, pp.47-65, 1979.
- 2) 地盤工学会: 地盤に関する解析技術(個別要素法)講習会, 講演資料, 2017.