

Ⅲ-B338 個別要素法による粒子間付着力を考慮した粒状体シミュレーション

清水建設(株)和泉研究室 正会員 吉田 順

1. はじめに

個別要素法（以下DEM）を粒状体解析に用いる場合に、粒子間の力-変位関係をばね-ダッシュポット系で表し、求められた鉛直力に摩擦係数を掛けてせん断強度を設定するスライダーを加味したモデルが一般的に用いられている。しかし、すべり摩擦のみを考慮したモデルではDEMの解法上転がりに対する抵抗が得られず、一旦転がり出した要素は障害物がないかぎり、回転運動を続けることとなり、粒状体の特徴の一つである安息角形成などの現象をうまく表現できないという問題が生じる。2次元DEMではこの対策として転がり摩擦を導入した解析も試みられており、実験とよい対比を示すことが阪口らによって報告されているが、3次元球要素では回転の方向を特定することおよび転がり抵抗の算出が困難と考えられる。また、転がりに対する抵抗を考慮可能なモデルとしては、非球形粒子と仮定した回転楕円体や結合要素を用いた検討もなされている。本研究では、このような転がりに対する抵抗を表現するための一つの試みとして、粒子間に付着（粘着）力を考慮したモデルを用いることを提案し、その検討結果を示すものである。

2. 解析モデルおよび条件

付着力を表現するモデルは図-1に示すようなものであり、付着力はせん断および引張に抵抗するものとし、垂直力が加わらない状態でのせん断強度（粘着力）と引張強度は等しいものと仮定している。

解析モデル1、モデル2には粒径 $d=1.0\text{cm}$ の球形粒子を用い、解析に用いた物性は表-1に示すようなものである。解析モデル1では、平板上に1個の粒子を置き、その斜め上方にもう1個の粒子を配置してその粒子が落下した後の挙動を追跡した。解析モデル2では、直径6cmの円柱状に積み上げた200個の粒子が直径10cmの円筒内に拡散する状況を追跡しており、いずれのモデルでも付着力の有無による結果の差について

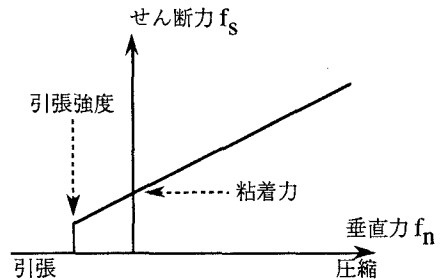


図-1 付着力モデル

表-1 材料定数

物性	記号	単位	数値
単位体積重量	γ	g/cm^3	2.0
比例減衰定数	β	sec	3.0×10^{-4}
垂直(せん断)剛性	$k_n(k_s)$	dyn/cm	$1.0 \times 10^7 (2.0 \times 10^6)$
摩擦係数(壁面)	μ		0.70(0.50)

検討するものである。付着力は粒子重量の約1000dynを考慮して、 10^3dyn および 10^4dyn とした。解析1ステップあたりの時間増分は $5.0 \times 10^{-5}\text{sec}$ であり、両モデルとも5000stepの解析を実施した。

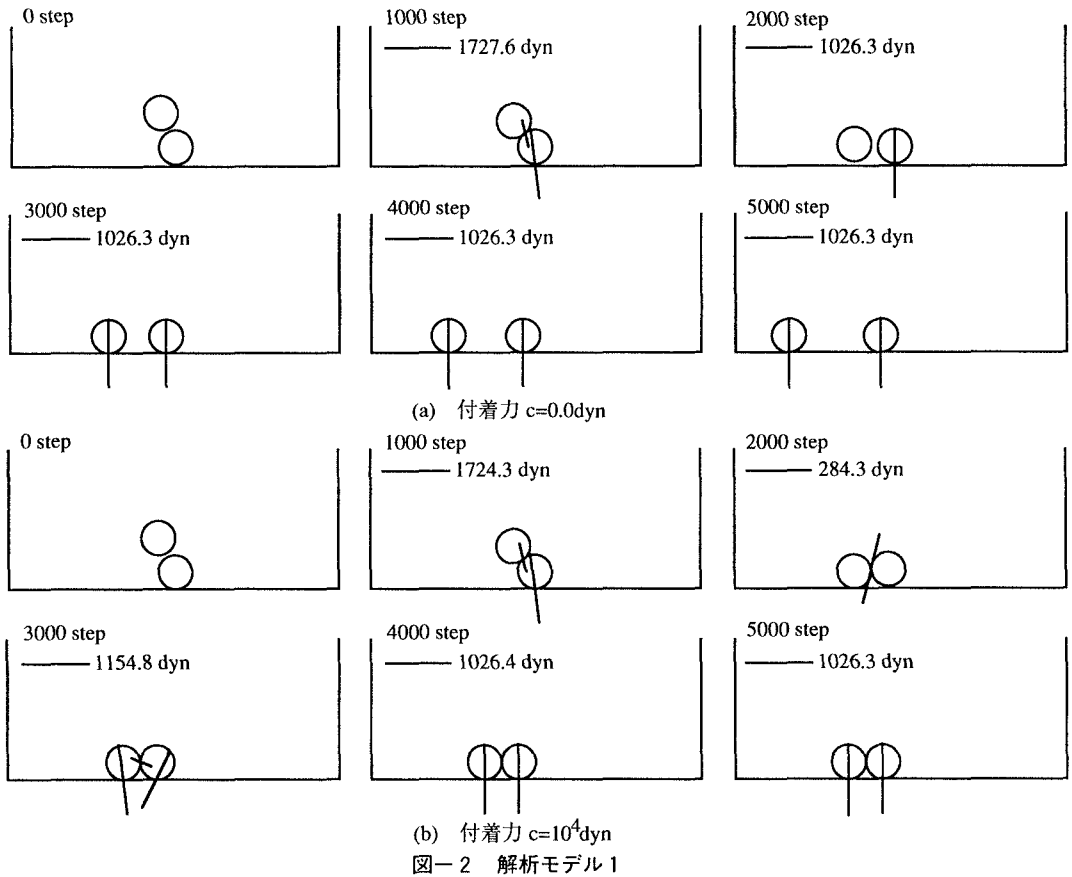
3. 解析結果および考察

(1) 解析モデル1

解析モデル1の結果を図-2の(a)が付着力 $c=0.0\text{dyn}$ の場合、(b)が $c=10^4\text{dyn}$ の場合を初期から1000step毎に示している。(a)の粒子が回転運動に対する抵抗がないために移動を継続するのに対し、(b)では付着力の効果で2粒子が連結要素のような動きを示し、4000~5000step間では粒子は静止状態となっており、粒子間に付着力を考慮することにより複数粒子のモデルでは回転拘束が可能であることを示している。接触力を比較すると5000stepの段階ではいずれのケースも最大接触力1026.3dynを示しているが、これは粒子1個の重量が底面反力として現れたものである。

(2) 解析モデル2

解析モデル2の初期状態および $c=0.0\text{dyn}$ 、 10^3dyn 、 10^4dyn のそれぞれの最終状態を図-3に示す。 $c=0.0\text{dyn}$ の場合にはほとんど堆積面がフラットになっているのに対し、 $c=10^3\text{dyn}$ では少し凹凸が見られるようになり、 $c=10^4\text{dyn}$ の場合には小山を形成している。これは付着力を考慮したことにより粒状体として特徴的な性質である安息角の形成が表されたことを示している。



4. おわりに

3次元DEMの粒子間の構成関係のせん断強度および引張強度として付着力を考慮した解析により、簡単なモデルのシミュレーションを行ない、付着力粒子間が粒状体の回転運動を拘束することおよび安息角形成を再現できることを示した。ただし、今回設定している付着力はあくまで仮想的なものであり、実際の粒子間力の液架橋力や静電的な力、ファンデルワース力を表したのではなく、粒子の非球形性などによる噛み合わせや転がりに体する抵抗を表すために導入したものである。したがって、今後は実験および実現象との対比により安息角や転がり抵抗を適切に表現できるような付着力の設定を検討する必要がある。

参考文献

Sakaguchi, H. et al.: Proc. 2nd Int. Conf. DEM, 153 (1993)

