

個別要素法を用いた二種混合体の安息角および接点力の評価

山口大学大学院	学生会員	○田上	聖人
山口大学大学院	正会員	中田	幸男
山口大学大学院	正会員	梶山	慎太郎

1. はじめに

礫や石などの粒径の大きい粒子を含む粗粒土は、盛土やロックフィルダム、海洋構造物の基礎などに幅広く利用される地盤材料であり、粗粒分と細粒分の混合割合によって土全体の性質が大きく変化するという特徴がある。粗粒土には、サンゴ礫混じり土や軽石などのように破砕性やいびつな形状の礫を含み特殊性を有するものが存在する。この特殊性は礫の含有率によって出現する程度が変化するため、含有率ごとの性質を把握する必要がある一方、粒子が大きいことから大型の試験装置が必要となり、試験のコストや時間が増大してしまう問題がある。そこで本研究では、簡単のために大粒子と小粒子の二種粒子の混合体(二種混合体)を粗粒土と見立てた。二種混合体について Ueda et al.¹⁾は、大粒子の含有率が低く、性質の主体が小粒子である構造を「小粒子主体構造」、大粒子の含有率が高く、性質の主体が大粒子である構造を「大粒子主体構造」、それらの間に位置する小粒子と大粒子の性質が入り混じった構造を「中間構造」と分類し、小粒子主体構造と中間構造の境界大粒子含有率を W_L^b 、中間構造と大粒子主体構造の境界大粒子含有率を W_L^a と定義している。著者らは、サンゴ礫や碎石などの形状の異なる大粒子と砂を混ぜ合わせて作成した二種混合体に対して、安息角の挙動を指標とした試験を実施し、粒子特性が二種混合体の主体構造に与える影響を評価した。本研究は、実験では直接取得できない、二種混合体内部における粒子の接点力や内部構造を評価するために、著者らが行った既往の実験を個別要素法(DEM 解析)により再現し、大粒子含有率および安息角の挙動と二種混合体内部の接点力の関係について考察する。

2. 安息角解析条件



Fig.1 Experimental particles and test container.
(From left, coral gravel, crushed stone, test container)

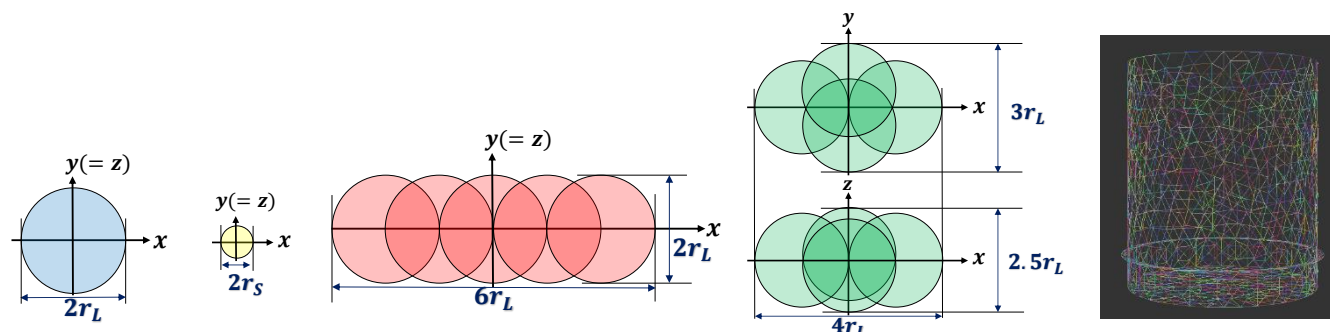


Fig.2 Analytical particles and test container.

(From left, spherical large particle, small particle, cylindrical large particle, oblate ellipsoid large particle, test container)

キーワード 個別要素法, 安息角, 粒径

連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 地盤工学研究室

TEL : 0836-85-7326

安息角実験²⁾で用いたサンゴ礫と碎石(図-1)のモデル粒子である円柱大粒子と扁平楕円体大粒子は、図-2のように球体の大粒子を複数組み合わせることで再現した。円柱大粒子は、5つの球体大粒子を半径 r_L 分オーバーラップさせて連結し、扁平楕円体大粒子は、 x 軸方向に2つの球体大粒子が接するように配置し、 y 軸方向には半径 r_L 分、 z 軸方向には半径の半分 $1/2 r_L$ 分オーバーラップさせて配置して作成している。なお、粒子数を削減させて計算負荷を軽減するために、球体大粒子と小粒子の粒径は、実験よりも大きい $r_L = 0.01m$ 、 $r_s = 0.004m$ としている。

Table. 1 Analysis parameters.

	Unit	Large particle		Small particle	Mesh (Test container)
		Cylinder	Ellipsoid		
Poisson's ratio	-	0.30	0.27	0.17	0.29
Density	kg/m ³	2845	2680	2657	8000
Climb speed	m/s				0.0026
Interparticle friction	rad	0.5			
Damping ratio	-	0.8			
Young's modulus	N/m ²	1.13×10^8			

表-1に解析に用いたパラメータを示す。ポアソン比、密度、試験容器の上昇速度に関しては、実験で用いた試料の物性値や試験条件を基に決定した。しかし、粒子間摩擦、減衰率、ヤング率に関しては、実際の値を使用すると非常に計算負荷が大きくなってしまう。そこで、粒子間摩擦と減衰率は既往の研究を基に決定し、ヤング率は、Otsubo et al.³⁾の手法を参考にして、粒子に最も負荷がかかる状態において、粒子同士のオーバーラップが粒径の1%以内になるように基準を設け、そこから逆算した値を採用した。

3. 安息角解析手順

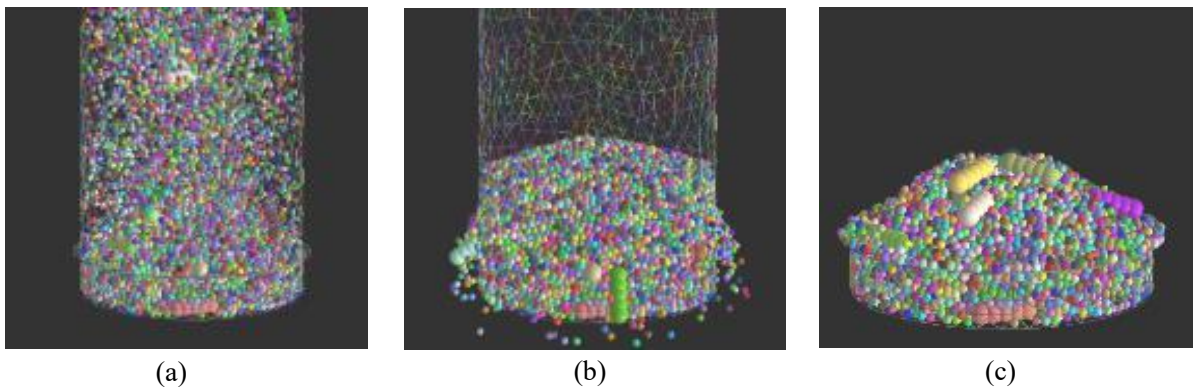


Fig. 3 Procedure for angle of repose analysis.

図-3は、安息角解析の各過程における様子である。安息角解析手順を以下に示す。

- 試験容器メッシュの上に、目標の大粒子含有率になるように大粒子と小粒子を生成し、粒子を自由落下させて試験容器メッシュに充填させる。
 - 上部の試験容器メッシュを0.0026m/sで上昇させ、解析粒子を排出する。
 - 解析粒子の運動がなくなるまで放置し、安息角を算出する。
- (a)~(c)の手順を、大粒子含有率を変えながら繰り返す。大粒子含有率0%, 100%についても解析を行う。安息角の測定方法は明確にされておらず、多種にわたるが、本研究では、砂山の頂点に位置する粒子と試験容器メッシュの端を結ぶ線で出来る角度を安息角としている。また、今回の安息角解析において、もっとも計算負荷の大きかった大粒子含有率0%のケースでは、Intel社のCPU(Corei7-6700k：コアクロック数4.0GHz、4コア)を搭載した計算機を用いて約12日の計算時間を要した。

4. 安息角解析結果

4-1. 粒子特性と安息角の関係

図-4 は、個別要素法における安息角解析の結果をまとめたものである。安息角の結果から主体構造の境界大粒子含有率 W_L^b , W_L^a を判定する基準は、 W_L^b が「安息角の実験値が小粒子単体の安息角から変化し始める大粒子含有率」、 W_L^a が「安息角の実験値が大粒子単体の安息角と等しくなる大粒子含有率」としている。小粒子主体の構造から中間構造になる大粒子含有率 W_L^b は、円柱大粒子が 15%、扁平楕円体大粒子が 22.5% であり、大粒子が大きく、形状が球体から離れたものほど値が小さくなった。この傾向は、サンゴ礫と碎石に対して行った安息角実験²⁾の傾向と一致する。中間構造から大粒子主体の構造になる大粒子含有率 W_L^a は、円柱大粒子が 85% であつたのに対し、扁平楕円体大粒子では大粒子含有率が 100% になるまで、安息角が大粒子単体の安息角と等しくならなかったため、判定できなかった。しかし、全体としては、実験の傾向を再現できたと判断できる。

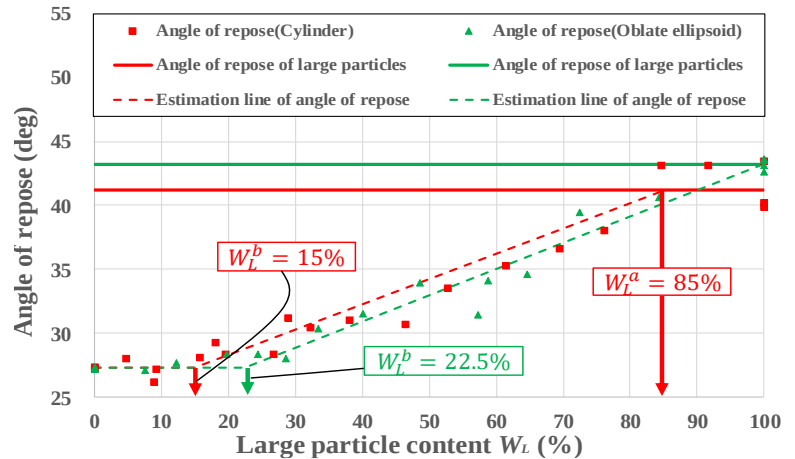


Fig. 4 Relationship between large particle content and angle of repose.

4-2. 接点力および接点ベクトルと安息角の関係

接点力と安息角の関係についての考察には、より実験結果の再現度が高いと考えられる円柱大粒子の解析結果を基に行う。ここで、二種混合体の主体構造の境界大粒子含有率 W_L^b , W_L^a に最も近い 15.7% と 84.5%、それらの中間に位置する 52.8% の結果を代表大粒子含有率の結果とする。図-5 に代表大粒子含有率における安息状態の砂山と接点ベクトル、図-6 に代表大粒子含有率における接点力の累積分布関数、図-7 に安息角と接点力の分散の関係、図-8 に安息角と接点力が $6.99 \times 10^{-3} [N]$ 以下の接触点の割合との関係を示す。図-5 から、高い接点力を示す接点ベクトルは、大粒子含有率が低い場合、砂山中央の深部に集中し、含有率が上昇するにつれて、中央深部から砂山全体に広がりながら増加していくことが見て取れる。大粒子含有率の上昇によって、高い接点力を示す接点ベクトルが増加するのは、安息角の増加つまり砂山の体積および重量の増加することと、小粒子が大粒子に置き換わることで、安息状態の砂山を維持する粒子の個数が減少し、粒子一つあたりにかかる力が増加するためであると考えられる。また、図-6 から、大粒子含有率の上昇に伴い、 $1.7 \times 10^{-2} [N]$ を境界にして、 $1.7 \times 10^{-2} [N]$ 以上の接点力では減少傾向がみられ、 $1.7 \times 10^{-2} [N]$ 以下の接点力では増加傾向がみられ、全体の分布が平均化していくことが見て取れる。図-7 から、二種混合体の主体構造が小粒子主体構造から中間構造に移り変わる大粒子含有率 W_L^b における安息角を境界にして、分散が増加していることが見て取れる。これは、安息角が小粒子単体のものから変化し始めると、安息状態の砂山内部の接点力の分散が大きくなる。つまり、とり得る接点力の幅が広くなることを意味している。図-8 を作図するにあたり、安息状態の砂山を維持する役割を担う接触点と、担わない接触点の境界となる接点力の境界を設定する必要があつた。そこで本研究では、小粒子の自重による接点力 $6.99 \times 10^{-3} [N]$ を境界とし、接点力が $6.99 \times 10^{-3} [N]$ 以下の接触点全体が全体の接触点に占める割合と安息角の関係を図-8 に示した。その結果、安息状態の砂山を維持する役割を担わない接触点 ($6.99 \times 10^{-3} [N]$ 以下の接触点) の割合が、境界大粒子含有率 W_L^b における安息角を境に顕著に増加していることが分かった。こうした図-6～図-8 の事象が発生する要因として、二種混合体内部の大粒子による骨格構造の形成(図-5)の影響が考えられる。二種混合体の安息角が大粒子含有率によって変化するメカニズムは、大粒子含有率の上昇により、大粒子同士が接近または接触し、内部に大粒子による骨格構造が形成されていくことで、二種混合体の安息角が、小粒子単体(大粒子含有率 0%)の安息角から大粒子単体(大粒子含有率 100%)

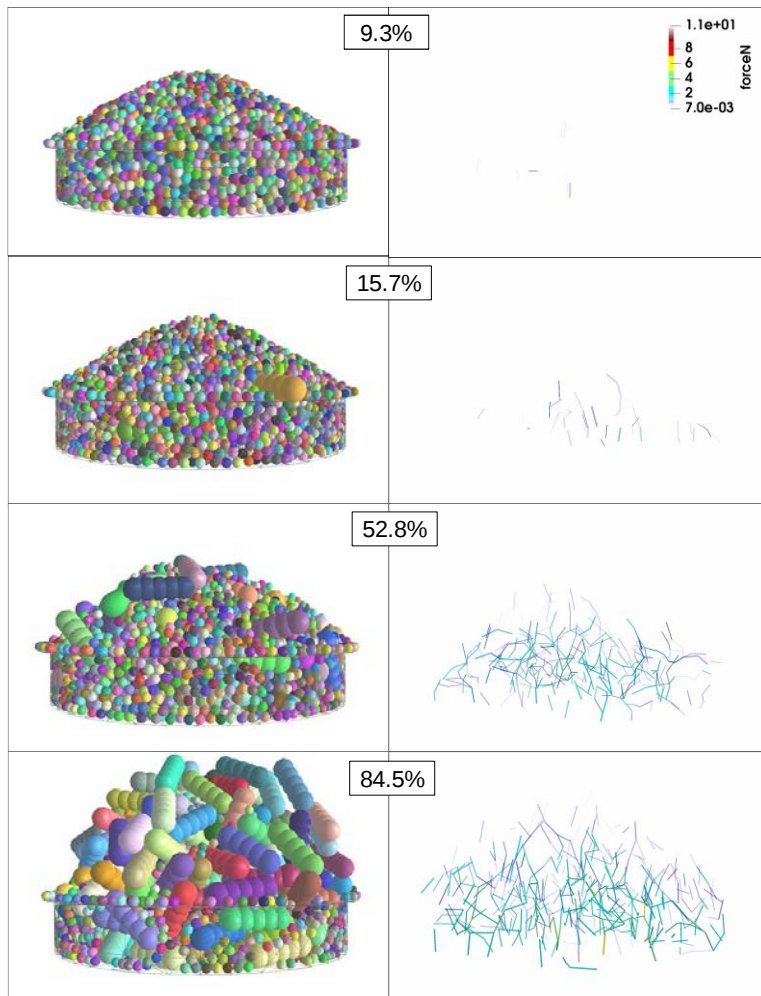


Fig. 5 Visualization image of sand pit and contact vector at representative large particle content.

の安息角に近づいていくためとされている¹⁾²⁾。本解析では、小粒子単体の場合、粒径が単一であるため、安息状態の砂山の維持に必要な接点力を比較的均等に分担されるが、大粒子含有率の上昇により、大粒子の骨格構造が形成され、大粒子の骨格構造の隙間に存在する小粒子が担う接点力が減少した。小粒子と大粒子の粒子数は、小粒子のほうが圧倒的に多いため、砂山内部の総接点数のうち、接点力の小さいものが多数を占めることになる。その結果、安息状態の砂山の維持する役割を担わない接触点の割合が増加し、分散が大きくなったと考えられる。

5. おわりに

本研究では、個別要素法を用いて二種混合体に対して行われた安息角実験を再現することで、大粒子含有率および安息角の挙動と二種混合体内部の接点力の関係について考察した。その結果、大粒子含有率が上昇し、安息角が大きくなると、高い接点力を示す接触点が、砂山中央の下部に多く分布すること、主体構造の境界大粒子含有率 W_L^b における安息角を境にして、接点力の分散が増加すること、安息状態の砂山を維持する役割を担わない接触点の割合が、増加することなどが明らかになった。

参考文献

- 1) Takao Ueda, Takashi Matsushima, Yasuo Yamada : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, Granular Matter, Vol.13, No.6, pp.731-742, 2011.
- 2) 田上聖人, 中田幸男, 梶山慎太郎: 粗粒土の安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響, 地盤と建設, Vol.37, No.1, 2019.
- 3) Masahide Otsubo, Catherine O'Sullivan, Tom Shire : Empirical assessment of the critical time increment in explicit particulate discrete element method simulations, Computers and Geotechnics, No.86 pp.67-79, 2017.

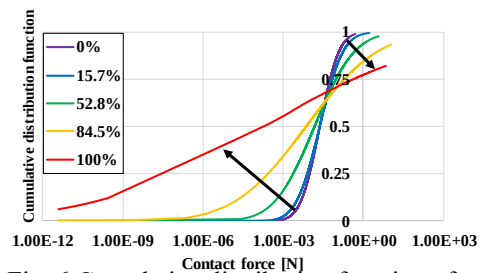


Fig. 6 Cumulative distribution function of contact force.

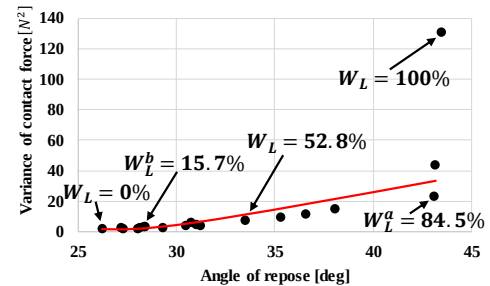


Fig. 7 Relationship between angle of repose and variance of contact force.

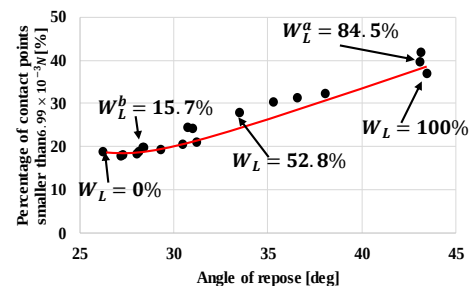


Fig. 8 Relationship between angle of repose and percentage of contact points smaller than 6.99×10^{-3} [N]