

III-A 39

正多角形個別要素法を用いた粒状体の単純せん断シミュレーション

東京大学生産技術研究所  
同上

学生会員 松島 亘志  
正会員 小長井一男

1. はじめに

本研究は、個別要素法を用いて、土などの実際の粒子の持つ複雑な形状が粒状体全体としての挙動に与える影響について検討したものである。粒子形状に関する過去の研究<sup>(1)(2)</sup>によれば、粒子の複雑な形状を、全体的な形状（細長いか、丸っこいかなど）を表す指標（circularity, sphericity）と、粒子表面の細かい凹凸を表す指標（angularity, roundness）とに分けて考えることが多いが、ここでは正多角形の要素を用いて単純せん断試験のシミュレーションを行い、angularity が粒状体のせん断強度特性に及ぼす影響について検討した。

2. 正多角形個別要素法のアルゴリズム

正多角形の粒子を用いる上で問題となるのは、粒子間の接触判定および接触力の評価であるが、接触判定は、接触深さが最も大きくなる可能性のある角（Fig.1 においては  $A_m$ ）のみについて行う。接点を含む辺（ $B_n - B_{n+1}$ ）を接触面とし、接触面に垂直な方向と平行な方向に、それぞれ圧縮ばね、せん断ばねを考える。圧縮ばねの縮みは接触深さ  $d_c$  から求め、せん断ばねの伸びは、接触点における2粒子の相対速度を時間刻みで足し合わせていくことより求めている。

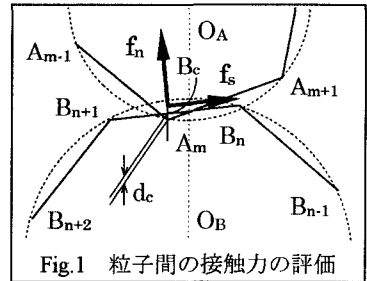


Fig.1 粒子間の接触力の評価

3. せん断変形時の粒子の相対運動

Table 1 に数値計算で用いたパラメーターを示す。モデルから得られる粒状体の弾性波速度  $V_p$ ,  $V_s$  及びヤング係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  はそれぞれ、 $V_p=221$  (m/s),  $V_s=110$  (m/s),  $E=832$  (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\nu=0.33$  である。粒径は約 1~4mm で、分布は正規分布に従うものとした。要素形状は、今回の計算では円形と正八角形の2種類を用いた。

Table 1 Parameters of the simulation

Density of element	2.5 g/cm <sup>3</sup>
Spring constant (normal)	9.6e5 N/m
Spring constant (shear)	2.4e5 N/m
Damping coefficient (normal)	2.0 kg/s
Damping coefficient (shear)	1.0 kg/s
Friction coefficient	0.51
time increment	0.51

Fig.2(a)(b)は、120個の円および115個の正八角形要素を単純せん断し、せん断歪みが約 2.6%となった時の粒子配置と接触力の分布を示している。供試体上壁は拘束圧を 2.5 (kgf/cm<sup>2</sup>)に保ちながら上下

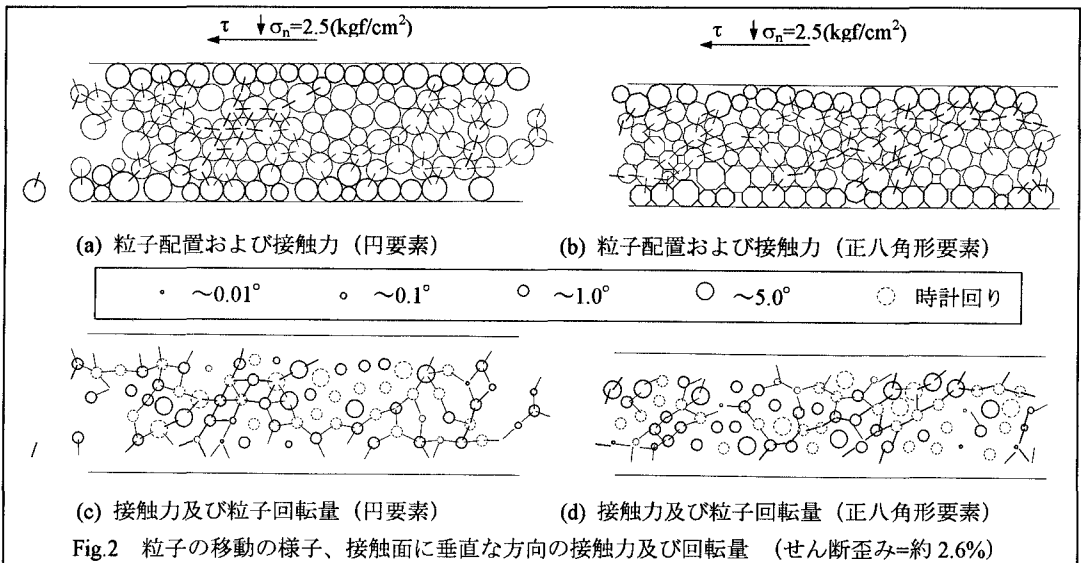


Fig.2 粒子の移動の様子、接触面に垂直な方向の接触力及び回転量（せん断歪み≒約 2.6%）

にのみ移動する圧力制御壁で、下壁に水平強制変位を与えてせん断を行なった。太線で描かれた粒子は上壁または下壁に固定されている。左右の境界は周期境界になっている<sup>(3)</sup>。0.1(kgf)以上の接触面に垂直な接点力を太い線分で示し、それ以下を細線で示した。応力を伝達する粒子の柱が形成されているが、円形要素モデルより、正八角形要素モデルのほうが、柱の傾きが大きく、せん断に対し効果的に抵抗している。Fig.2(c)(d)はせん断歪み2.2%~2.6%間の粒子回転量を円の半径の大きさで示したものである。破線で描かれた円は、時計回りの回転を示す。いずれのモデルも、時計回りと反時計回りの回転がほぼ同じ程度生じている。更に注目すべきは、応力を伝達する柱に沿って、円形粒子の場合は、時計回りと反時計回りの回転が交互に現れる傾向があるのに対し、

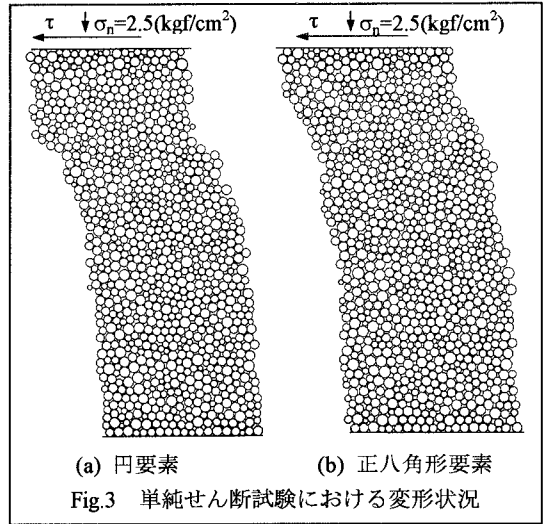


Fig.3 単純せん断試験における変形状況

正八角形要素では、2~3個の連なった粒子が同じ方向に回転している場合が多い。これは、円形粒子が接点において滑りの生じない歯車のような変形を起こしていること、一方正八角形要素では、接点において形状に起因するモーメント反力が存在するために粒子間の相対回転が起こりにくく、結果として2~3個の粒子が一体となって剛体回転していることを示している。

4. 単純せん断シミュレーションにおける強度特性

Fig.3(a)(b)は940個の円形及び正八角形要素を用い、高さ約130mm、1周期の幅約55mmの供試体の単純せん断試験における最終変形モードを示している。円形要素モデルに比べ、正八角形要素モデルは変形が比較的広い範囲に分布している。Fig.4にせん断歪みに対する応力比および体積歪みの関係を示す。応力比のデータは隣接平均を取って鈍らせてある。円形粒子の最大応力比が0.4程度であるのに対し、正八角形要素では0.6程度であり、より大きなせん断強度を有している。

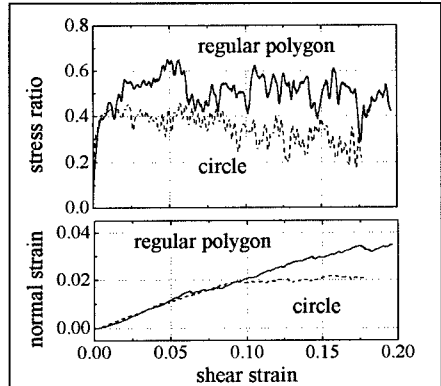


Fig.4 応力比、体積歪みとせん断歪みとの関係

Fig.5は正八角形要素の単純せん断シミュレーションにおけるエネルギー収支を示している。強制変位によって供試体に与えられるエネルギーが主に摩擦とダイレタンスーによって消費されていることがわかる。最終的なエネルギー収支の誤差は、強制変位によって与えられたエネルギーの1%程度に収まっており、エネルギー的には妥当な計算結果であると言える。

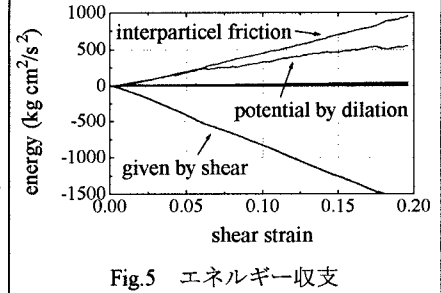


Fig.5 エネルギー収支

5. おわりに

円形および正八角形の要素を用いて単純せん断試験のシミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- (1) 粒子回転は、せん断の方向によらず時計回りと反時計回りの回転がほぼ同じ程度生じる。
- (2) 応力を伝達する粒子の柱に沿って、円形要素の場合は、正と負の回転が交互に現れるのに対し、正八角形要素では、粒子形状に起因する接点モーメント反力によって2~3個の粒子が一体となって回転する。
- (3) 正八角形要素では円形粒子よりも変形の集中が少なく、せん断強度が大きい。

参考文献

(1)吉田輝：東京大学博士論文，1994。(2)吉村他：土木学会論文集No.463/III-22, pp.95-103, 1993。(3)澤田純男他：第27回土質工学研究発表会発表講演集, pp.573-576, 1992。