

## 個別要素粒状体の残留強度・変形挙動に与える粒子間付着力の影響

神戸市 正会員 吉森久貴  
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 加藤正司  
 CRC ソリューションズ 正会員 榊原辰雄

**はじめに** 土質力学において、飽和土の挙動についての研究は数多くなされており、ある程度解明されてきている。しかし、盛土などの多くの土構造物は不飽和状態であり、この不飽和状態の土の挙動を解明することが土質工学上重要な課題であるといえる。これまでの研究の結果、不飽和土の挙動にはサクシオンが大きく影響を及ぼすことが分かっており、サクシオンを考慮した解析により、不飽和土の挙動を解明することが必要といえる。そこで土の挙動の重要な要素であるピーク強度、残留強度、変形特性について、個別要素粒状体の3次元DEM（個別要素法；Distinct Element Method）解析に粒子間付着力を導入し、検討を行った。ただし、ピーク強度による破壊規準の検討については別稿<sup>1)</sup>を参照されたい。また本研究では解析にItasca社のPFC3Dプログラムを用いた。

**材料定数と解析条件** 供試体は、2(m)×2(m)×4(m)の壁面を仮定し、その中に直径を5(cm)～10(cm)の間に正規分布するように調整した球形粒子を間隙比が0.4となるように5438個の粒子を発生させた。粒子の材料定数は表1の通りである。また供試体を図示すると図1のようになる。次にその供試体を等方圧縮応力1000(kPa)まで50(kPa)毎に圧縮し、平衡状態となった後、供試体の上下の載荷板によりせん断試験を行った。せん断時の応力経路は図2のように、静水圧軸上から面を見たときの $\sigma_y$ 軸方向からの角が $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ の5種類とし、同一面上を移動するように、時間増分毎に応力制御した。粒子間付着力(Adhesion)は粒子接平面に対し鉛直方向の値を5000(N)、10000(N)の2種類とし、粒子接平面に対し接線方向の値を $10^{10}$ (N)とした。この理由として、粒子間付着力は粒子間に働く力が粒子間付着力の規定値に達するまでは剛性を発揮する

が、粒子間に働く力が粒子間付着力の規定値を超えると、その後剛性を発揮しなくなるといった性質によるものである。また本解析で用いたプログラムの応力とひずみは伸張を正としている。

**Lade 規準の特性** LadeとDuncanはMonterey No.0 Sandの立方供試体を用いたTrue triaxial testによる実験結果から、以下の破壊規準を提案した<sup>2)</sup>。

$$\frac{I_1^3}{I_3} = \text{Constant} \quad (1)$$

ただし、 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 、 $I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$ 、 $I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$

式(1)を面上に図示すると図3のようになる。図からも分かるようにLade-Duncanの破壊規準はの値によって形状が変化している。

表1 材料定数

	Particle-particle	Particle-wall
Normal stiffness $k_n$ (N/m)	$9.0 \times 10^9$	$1.8 \times 10^{10}$
Shear stiffness $k_s$ (N/m)	$3.8 \times 10^8$	$6.0 \times 10^8$
Coefficient of friction	0.287	0.0
Density of particles ( $\text{kg/m}^3$ )	2700	

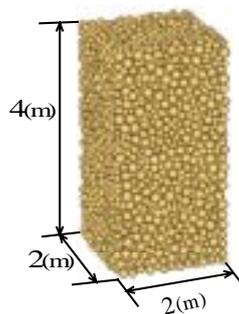


図1 供試体

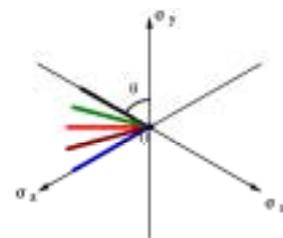


図2 応力経路

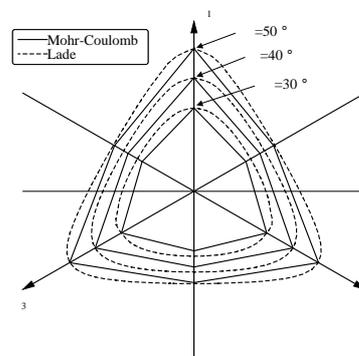


図3 Lade 規準と

Mohr-Coulomb 規準の比較

キーワード 粒子間付着力、残留強度、せん断ひずみ

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, TEL: 078-803-6030, FAX: 078-803-6030

**解析結果と考察** 図4, 図5は粒子間付着力0(N), 10000(N)のシリーズにおいて, 応力~ひずみ関係の軸ひずみ0.2の点を残留強度点とし, 面上に図示したものである. それぞれ図中の実線はMises規準, 一点鎖線はMohr-Coulomb規準, 破線はSMP規準である. これらの図から, 残留強度線はSMP規準とほぼ一致した傾向が見られる. このことから, 限界状態の残留強度と一般にいわれる残留強度に近い値を示す粘性土にはSMP規準が適用される可能性が示唆される.

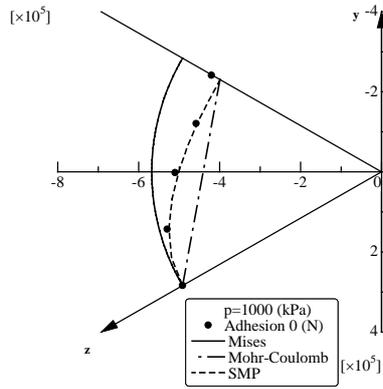


図4 粒子間付着力0(N) 面上の残留強度点

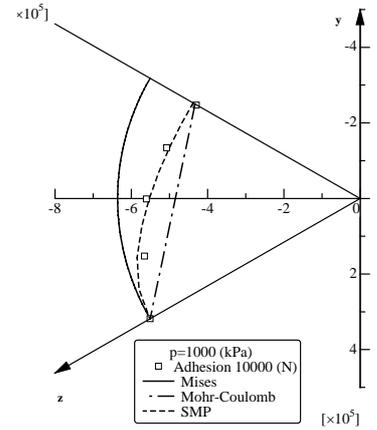


図5 粒子間付着力10000(N) 面上の残留強度点

またこのことは, 過去に軽部ら<sup>3)</sup>が複合応力状態において粘性土の実験を行って得た, 粘性土の破壊点はMohr-Coulomb規準に外接する曲線で表される, という結果にも一致する. 図6は粒子間付着力0(N), 10000(N)のシリーズの等せん断ひずみ線を面上に図示したものである. 図中の等せん断ひずみ線は内側から順に0.003, 0.004, 0.005, 0.007, 0.010のせん断ひずみを表している. この図から, 等せん断ひずみ線は粒子間付着力が加わることで同心円形状から変形していることが分かる. またそれぞれのシリーズにおいては, せん断ひずみが大きくなるにつれて, 変形した状態から同心円形状に近づいているように見える. 図7は等せん断ひずみ点とLade規準を比較したものである. 図中のLADE規準は平均主応力500(kPa), 1000(kPa)の2種類のシリーズにおいて粒子間付着力を0(N), 5000(N), 10000(N)加えた場合のピーク強度点を破壊点とし, 求められた内部摩擦角の値に対応するものである. この図から, 粒子間付着力が0(N)のシリーズはLade規準と一致する傾向が見られ, 付着力が5000(N), 10000(N)のシリーズではややLade規準よりも外側にある傾向だが, よい適合性が見られたと思われる. このことから, 破壊規準<sup>1)</sup>だけではなく, 変形挙動もLade規準に一致する傾向が見られたといえる.

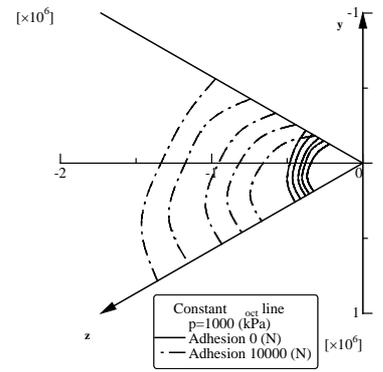


図6 面上の残留強度線

**結論** 1) 面上における残留強度点は, SMP規準に一致する傾向を示した. このことは, 正規粘土のようなせん断時に圧縮する材料の破壊規準がSMP規準に従う可能性を示している.

2) 面上における等せん断ひずみ線は, Lade規準と一致する傾向を示した. このことは, 砂のような粒状材料については破壊規準のみならず, 変形挙動までもがLade規準に従うことを示している.

**謝辞** 本研究は文部科学省科学研究費(基盤研究(c2), 課題番号13650541)の援助により行われたものである. ここに謝意を表する.

**参考文献** 1) 吉森久貴, 加藤正司, 榊原辰雄: 個別要素粒状体の破壊規準に与える粒子間付着力の影響, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.

2) Lade, P. V., A.M.ASCE and James M.Duncan, M.ASCE: Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil, Journal of the Geotechnical Engineering Division, pp1037-1153, 1975

3) 軽部大蔵, 柴田徹: 複合応力状態における土の挙動について, 京都大学防災研究所年報第7号, 1964.

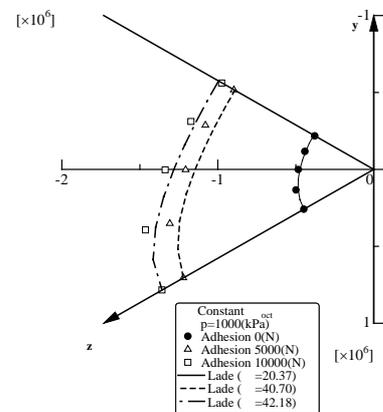


図7 面上の等せん断ひずみ線とLADE規準の比較