

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

不飽和土 破壊規準 個別要素法

神戸市 正会員 吉森久貴  
神戸大学工学部 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。そこで土の挙動の代表的な要素である破壊規準について、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。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y軸方向からの角が60°,75°,90°,105°,120°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<sup>10</sup>(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う性質によるものである。また本解析で用いたプログラムにおける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>1)</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。

**解析結果と考察** 図3は =120°の三軸圧縮条件での応力~ひずみ関係、図4は =60°の三軸伸張条件での応力~ひずみ関係である。図3、図4より、粒子間付着力を加えたものには明らかなピーク強度が存在することがわかる。これは、粒子が徐々に再配列しながら強度を発揮する粒子間付着力0(N)のものに対し、粒子間付着力5000(N),10000(N)を加えたものは接点にかかる力が粒子間付着力の規定値になるまでは再配列を許さないで、急激に強度を発揮し、多くの接点にかかる力が粒子間付着力の規定値となるピーク強度を過ぎてからは粒子間付着力が強度を発揮しなくなり、急激に強度が低下するものと考えられる。また粒子間付着力が5000(N),10000(N)のシリーズは、主応力差が同じ経路を辿って増加した後にピーク強度に達している。このことも、既定の値までは強度を発揮し、その値を超えると強度を全く発揮しなくなるという粒子間付着力の性質に起因するものと考えられる。体積ひずみは粒子間付着力が増えると膨張量が増加し、また粒子間付着力が大きくなるにつれ、膨張量が増加する傾向が見られる。図6は三軸圧縮条件の応力~ひずみ関係におけるピーク強度点を破壊点とし、平均主応力500(kPa),1000(kPa)の2種類について破壊点をp-q面上に示したものである。この図より、粒子間付着力が増えると破壊点を結んだ直線の傾きが大きくなっているこ

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 (kg/m <sup>3</sup> )	2700	

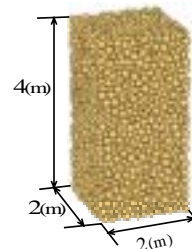


図1 供試体

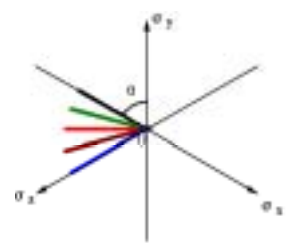


図2 応力経路

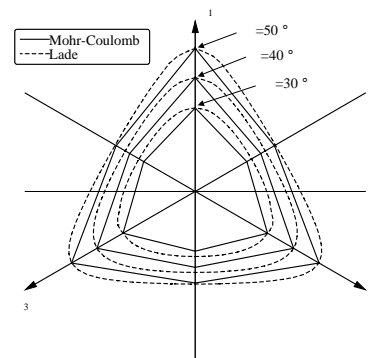


図3 Lade 規準と Mohr-Coulomb 規準の比較

Effect of adhesion on failure criteria for granular material, Hisaki Yoshimori(Kobe city government),Shoji Kato(Kobe university),Tatuo Sakakibara(CRC solutions)

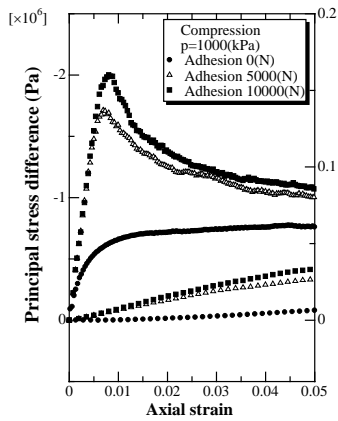


図4 圧縮条件 応力～ひずみ関係

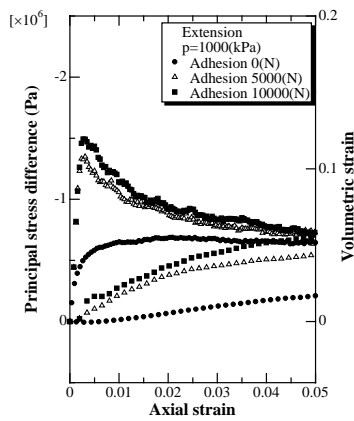


図5 伸張条件 応力～ひずみ関係

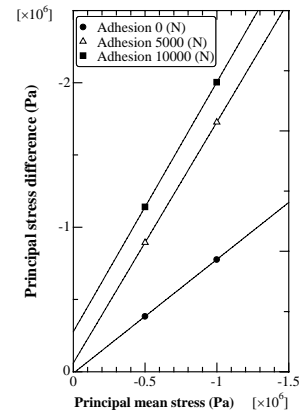


図6 p-q 面

とが分かる．また、粒子間付着力の大きさによっても破壊点を結んだ直線の傾きは大きくなっている．このことは粒子間付着力は粘着力  $c$  だけではなく内部摩擦角にも影響しているということである．この結果からそれぞれの粒子間付着力を加えたときの粘着力  $c$ 、内部摩擦角の値を求めると、表2のようになる．過去に軽部ら<sup>2)</sup>は、締めめた粘土供試体を用いて、サクシオンおよび平均基底応力一定の三軸圧縮試験を行い、サクシオンの増加により内部摩擦角が増加したと報告している．今回の解析結果においても、粒子間付着力の増加は内部摩擦角に対し同様な影響を与えおり、粒子間付着力によりサクシオンの影響を再現できているものと考えられる．図7はそれぞれのシリーズの破壊点を

面上に示したもので、図中の実線は Mises 規準、一点鎖線は Mohr-Coulomb 規準、ピッチの小さい破線は Lade 規準で  $\phi = 20.37^\circ$  のときのもの、二点鎖線は Lade 規準で  $\phi = 40.70^\circ$  のときのもの、ピッチの大きい破線は Lade 規準で  $\phi = 42.18^\circ$  のときのものである．図8は粒子間付着力が 5000(N)、10000(N)のシリーズを相似縮小し、粒子間付着力が加えられていないシリーズと圧縮条件で同一となるようにしたものである．図中の実線は Mises 規準、一点鎖線は Mohr-Coulomb 規準、ピッチの小さい破線は Lade 規準で  $\phi = 20.37^\circ$  のときのもの、二点鎖線は Lade 規準で  $\phi = 40.70^\circ$  のときを相似縮小したものである．図7より、粒子間付着力が 0(N)と 10000(N)のシリーズの破壊点は Lade 規準に一致しているように見える．しかし、粒子間付着力が 5000(N)のシリーズでは Lade 規準のやや外側の線を通っているように見える．図8より、粒子間付着力を加えていくと破壊線は内側へ移動していることが分かる．そしてそれと同じように Lade 規準も  $\phi$  の増加により内側に移動している．よって本研究の解析結果は Lade 規準とほぼ一致した傾向が見られたといえる．

**結論** 1) 粒子間付着力を増加させると、ピーク強度に基づく内部摩擦角および粘着力は増加する傾向を示した．これは、従来サクシオン一定での不飽和土の三軸圧縮試験結果において得られている傾向と一致している．

2) 面上におけるピーク強度点は、Lade 規準に一致する傾向を示した．このことは、砂のような粒状材料の破壊規準が Lade 規準に従う可能性を示している．

**謝辞** 本研究は文部科学省科学研究費（基盤研究（ $c_2$ ）, 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) 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

2) 軽部大蔵、加藤正司、勝山潤一：不飽和カオリンの有効応力と力学定数，土木学会論文集，No.370，pp.179-188，1986.

表2 粒子間付着力と粘着力・内部摩擦角の関係

Adhesion (N)	c (kPa)	(degrees)
0	4.9	20.37
5000	-31	40.70
10000	-140	42.18

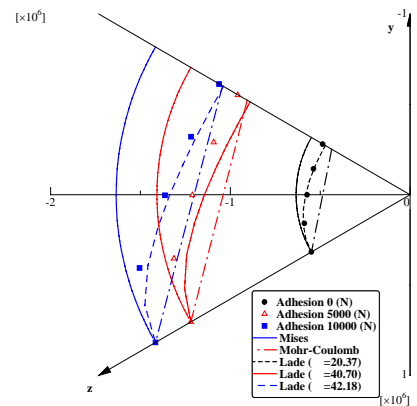


図7 面上の破壊線

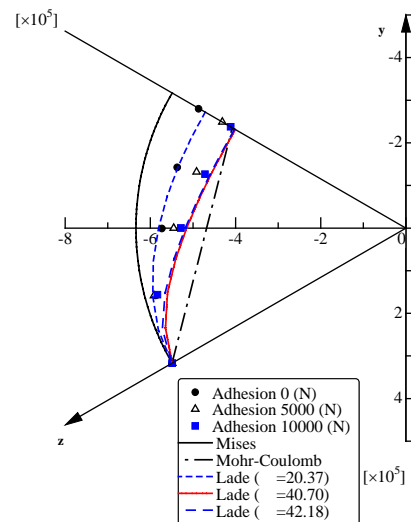


図8 面上の破壊線（正規化）