

III-6 シミュレーションによる粒状体の破壊基準の評価

東北大学 学生会員 ○水野谷 勇輝
 フェロー 岸野 佑次
 学生会員 郷 春躍

1. はじめに

砂などの地盤材料は、離散的な粒子の集合体であり、その力学挙動を解明するために様々なアプローチがなされている。近年、粒状体の変形・強度特性などを調べるために、計算機による数値シミュレーション試験が盛んに行われている。数値シミュレーション試験の中で、岸野¹⁾によって提案された粒状要素法は、粒子の接触関係から得られる剛性行列に基づいて粒子を移動させる準静的な解析法であり、粒状体の静的な微視的挙動の考察や構成則レベルの議論に対して非常に有効な解析手法である。

本研究は、3次元粒状要素法を用いて π 平面上での多方向せん断載荷シミュレーション試験を行い、その結果に基づいて粒状体の破壊基準に関して考察を行ったものである。

2. 3次元粒状要素法を用いた多方向せん断載荷シミュレーション試験

材料の降伏のメカニズムは通常、応力を等方成分と偏差成分に分解して論じられる。例えば金属の降伏条件には偏差成分のみが影響を及ぼすと仮定することが多い。等方応力は、主応力空間において方向 $n = (\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}})^t$ の軸（等方応力軸）上に表される。一方、偏差応力は、等方応力軸に垂直な π 平面上に表現される。

本研究では供試体モデルを等方応力軸 n 上のA点まで等方圧縮し初期状態とする。その後、 π 平面上での多方向せん断載荷を行う。載荷経路を図1に示す。

多方向せん断載荷シミュレーション試験は応力制御により実施する。シミュレーション試験の載荷方向は、 π 平面上で見て、 σ_z 軸から反時計回りに 15° 間隔で計24方向とする。

使用する粒状体モデルについて、詳細を表1に示す。ここで、接触点における法線方向および接線方向のバネ定数をそれぞれ、 k_n 、 k_t とした。試験に用いた粒状供試体モデルを図2に示す。

表-1 供試体データ

粒子数	粒子直径 (mm)	k_n (kN/m)	k_t (kN/m)	内部 摩擦角度($^\circ$)
1577	0.16~0.3	40	28	15

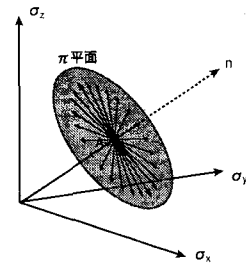


図-1 多方向せん断載荷シミュレーション試験の載荷経路

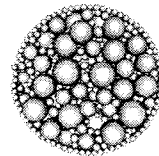


図-2 粒状体モデル

3. シミュレーション試験結果とその考察

図3に各載荷方向の応力-ひずみ曲線を示す。応力は偏差応力のノルム $|\sigma - Itr\sigma/3|$ 、ひずみは偏差ひずみのノルム $|\epsilon - Itr\epsilon/3|$ で示した。砂などの実際の試験で見られるように、三軸圧縮において偏差応力のピーク値は最大となり、三軸伸張において最小となっている。

偏差ひずみ、塑性せん断エネルギー、塑性ひずみのパラメータに着目して、これらの値が等しくなる点を結んだ線を降伏曲面とみなした場合、どのような違いが出てくるのか、また載荷レベルに伴い降伏曲面にどのような変化が起こるのか検証を行う。以下偏差ひずみ ϵ^{dev} 、塑性せん断エネルギー W 、塑性ひずみ ϵ^p を、それぞれ次式で定義する。

$$|\epsilon^{dev}| = |\epsilon - Itr\epsilon/3| \quad (1)$$

$$W = \int \sigma d\epsilon^p \quad (2)$$

$$|\epsilon^p| = \left| \int d\epsilon^p \right| \quad (3)$$

なお $d\epsilon^p$ は載荷ステップ毎に除荷を行い、 $d\epsilon^e$ を求め、これを $d\epsilon$ より差引くことにより求めた。

図4、5はそれぞれ、3つのパラメータ間において、同一の応力レベル（硬化レベル）についての降伏曲面を比較し

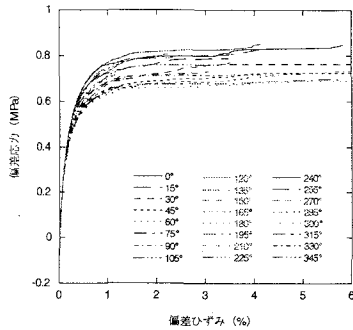


図-3 応力-ひずみ曲線

たものである。図4に示されるように、どのパラメータについても、せん断载荷の初期段階では、塑性変形のレベルは小さく、降伏曲面はほぼ円形となっている。しかし、せん断応力の载荷レベルが進むにつれて、図5のように三軸伸張方向の降伏が早く表れ、円形からの差異が生じ始め、おむすび型に移行した。また上のそれぞれの同図には、降伏曲面を表すとされる Lade²⁾の関数を実線で表示している。Lade の関数は次式で定義される。

$$I_1^3 - \kappa_1 I_3 = 0$$

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (4)$$

$$I_3 = \sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33}$$

Lade の関数にもっとも近い曲線となるのは、3つのパラメータの中で、偏差ひずみである。塑性変形の小さな図4の円形の降伏曲面から、塑性変形が発達した図5のおむすび型まで、シミュレーション値は Lade の関数に良く乗っている。

最後に、応力制御による多方向载荷シミュレーション試験により、得られた各载荷方向の応力-ひずみ曲線において、ピーク強度を与える主応力の π 平面上のプロットを図6に示す。これは一つの破壊曲面を表していると考えられる。これらのプロットは全体的にはおむすび型の曲線に重なるが、135°、150°の载荷方向においては、他の载荷方向の偏差応力値と比べて低い値となっている。これはシミュレーション試験に用いた供試体が、この方向に偶然弱い構造になっていたためと考えられる。

この破壊曲面を、Lade の関数と比較すると、135°、150°の载荷方向を除けば、良い適合を示した。これは応力制御によるシミュレーション試験において、Lade の関数を用いることで、求められた破壊強度を良好に評価できるということを示している。

4. おわりに

塑性変形の発達していない载荷初期段階においては、それぞれのパラメータに多少のばらつきはあるものの、基本

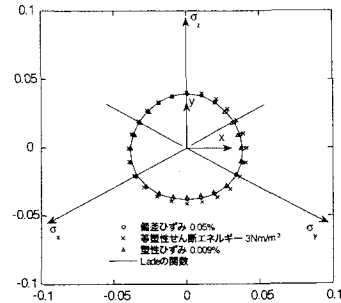


図-4 π 平面上における3つのパラメータ値を与える応力分布

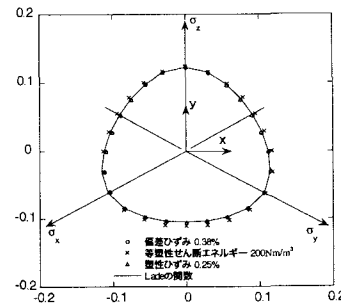


図-5 π 平面上における3つのパラメータ値を与える応力分布

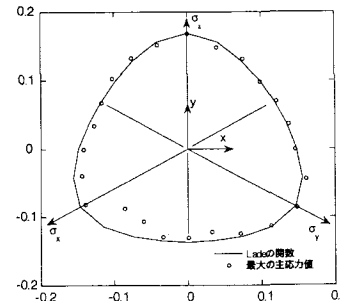


図-6 π 平面上におけるピーク強度を与える主応力の分布

的には円形となる。载荷レベルが進むに従って、おむすび型が得られる。偏差ひずみのパラメータに着目した場合の降伏曲面は、Lade の関数による曲線との適合度が高い。また Lade の関数は、応力制御によるせん断载荷シミュレーション試験によって求められた、ピーク強度を与える主応力も良好に評価できる。

参考文献

- 1) 岸野 佑次:新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, No.406/III-11, pp.97-106, 1989
- 2) Lade, P.V., Duncan, J.M.: Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.101, No. GT10, Oct., pp.1037-1053, 1975