

III-38

粒状材料の破壊基準に関する数値実験的研究

 八戸工業大学 学生会員 ○相澤龍弥
 八戸工業大学 正会員 金子賢治
 八戸工業大学 フェロー 熊谷浩二

1. はじめに

粒子集合体は地盤工学、粉体工学など多くの分野で重要な工学材料である。これらの強度特性に関して粒子自身の微視的特性と集合体としての巨視的な特性を関連づけて系統的に把握することは、多くの工学分野において極めて基本的かつ重要である。しかしながら、実験では条件が限られることや微視的特性を計測し把握することが困難なため、統一的に把握されていないのが現状である。一方、著者の一人は数学的均質化理論に基づく粒子集合体のミクロマクロ連成解析手法¹⁾を提案している。この手法によれば、周期境界条件下でのミクロスケール（微視構造）解析がマクロ構成関係を与えることが示されており、粒子レベルの微視的特性と材料の変形強度特性を結びつけることができる。本研究では、ミクロスケール解析がマクロ構成関係を与えることに着目し、3次元ミクロスケール解析により粒状材料の強度特性を把握することを目的として数値実験を行った。

2. 数値解析の概要

図-1に本研究に用いた粒状体モデルを示す。本モデルは、粒径0.03~0.07mmの範囲で1073個の球粒子を立方体領域にランダムに発生させ、等方応力によりつり合い状態を満足するように作成した。本研究では、 $p-q$ 面において破壊基準の初期等方応力依存性を確認するために、初期等方応力100kPa、200kPaの2ケースの解析を行った。また、法線および接線方向剛性50kN/m、35kN/m、粒子間摩擦角 15° を用いた。本研究では、初期等方応力状態から $p-q$ 面および π 平面上においてそれぞれ 15° 毎24方向に応力制御によりせん断応力シミュレーションを行い、応力のピークを破壊と定め破壊基準とする。

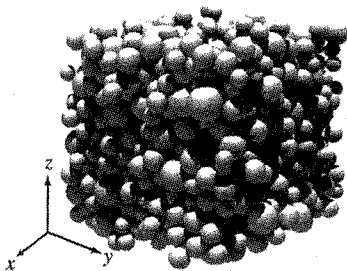


図-1 粒状体ミクロスケール解析モデル

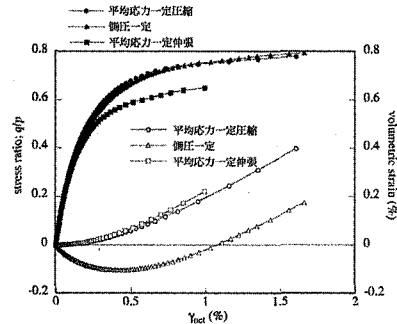


図-2 応力ひずみ曲線

本研究では応力のピークを破壊と定義するが、応力制御のため応力増分が0以下にはならない。したがって、ここでは、接線せん断剛性 $G = \Delta\tau_{oct}/\Delta\gamma_{oct}$ を用いて、载荷中の接線せん断剛性 G_i と初期接線せん断剛性 G_0 の比

$$R = G_i/G_0 \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

により評価することとした。パラメータ R はせん断剛性が初期状態と比べてどの程度低下したかを表している。

3. 解析結果と考察

 (1) $p-q$ 面における破壊基準

図-2に初期等方応力100kPaの場合の $p-q$ 面せん断応力シミュレーションの結果得られた代表的な応力ひずみ曲線を示す。図中には、平均応力一定圧縮および伸張、側圧一定圧縮の各経路における解析結果を示している。図-2より圧縮方向の八面体せん断ひずみと応力比の関係は、载荷経路によらずほぼ同じ応答を示している。ここでは全ては示さないが、他の载荷経路においても同様であった。また、伸張と圧縮と挙動に差が現れている。八面体せん断ひずみと体積ひずみの関係より、本研究で用いた粒状体ミクロスケール解析モデルが密な砂のような変形挙動を示すことがわかる。

図-3は、初期等方応力100kPa、200kPaの場合において $p-q$ 面上の24方向に対して行ったせん断シミュレーションの結果得られた、式(1)で定義されるパラメータ R が初めて2%以下となる時の応力状態を $p-q$ 面上にプロットしたものである。なお、 R が2%以下にならなかった载荷経路の場合はプロットしていない。通常の摩擦性材料の降伏基準としてよく用いられるMohr-Coulombの破壊基準等と同様の等方圧縮方向に開いた形状となる。ただし、頂点は原点ではなく p 軸上の等方圧縮方向に若干ずれている。圧縮方向

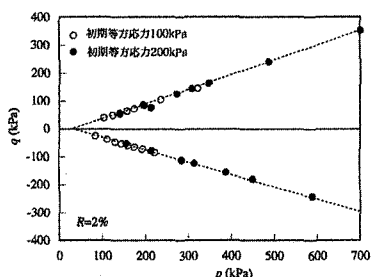


図-3 $p-q$ 面における破壊基準

でより強く引張方向が弱いといった粒状材料の強度の異方性が現れている。また、初期の等方応力の違いによらずほぼ1つの直線になることから、この材料固有の破壊基準が得られていると考えることができる。

Cheng ら²⁾は、マルチスケールの考え方による解析ではないが、破碎性粒子を想定した個別要素解析によって、同様の破壊基準の推定を行っており、等方圧縮方向にも閉じた曲面を求めている。本解析は粒子の破碎は想定しておらず、非弾性的な粒子間のメカニズムは粒子の接触と摩擦のみであるため、等方圧縮に近い方向への载荷においては明確な応力のピークは出現しないと考えられる。

(2) π 平面における破壊基準

図-4に π 平面内におけるせん断载荷シミュレーションの結果得られた代表的な経路の応力ひずみ曲線を示す。図中に示した path 15 などの数字はそれぞれ π 平面の σ_{zz} 軸から反時計回りの角度を表している。なお、path 90は平均応力一定の3軸圧縮方向であり $p-q$ 面におけるものと一致する。また、path 60は3軸伸張方向である。同図の八面体せん断ひずみと応力比の関係より圧縮方向と伸張方向など、载荷方向による強度の違いが現れている。また、八面体せん断ひずみと体積ひずみの関係は、平均応力を一定に制御しているため、どの载荷経路においてもほぼ一定の挙動を示している。

図-5は、初期等方応力100kPaにおける π 平面上のせん断シミュレーションの結果得られた、パラメータ R が2%の時の応力状態を π 平面上にプロットしたものである。図中には、Ladeのパラメータ³⁾および松岡・中井(SMP)基準⁴⁾も同時に示した。なお、これらのパラメータは π 平面上の Σ_{zz} 軸方向への载荷経路の場合を基準に定めた。同図より载荷経路による異方性を含んだおにぎり型の破壊基準が得られことがわかる。また、LadeのパラメータおよびSMP基準に非常に近い結果となっているが、理想化した球要素を用いた今回の数値実験においてはSMP基準よりもLadeのパラメータに若干近い結果となった。なお、曲面に多少ばらつきがあるが、粒子数が十分ではないために生じる初期

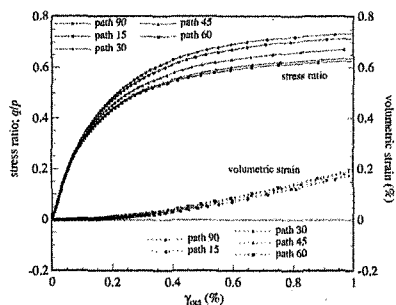


図-4 応力ひずみ曲線 (π 平面)

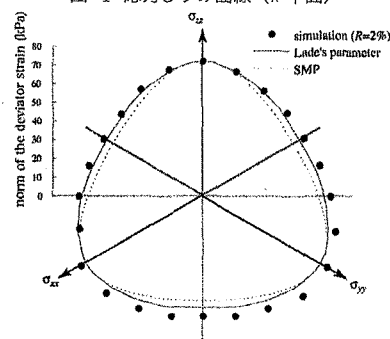


図-5 π 平面における破壊基準 (初期応力 100kPa)

状態の内部構造異方性の影響によるものと考えられる。十分多くの粒子を含むモデルを用いることでより滑らかな曲面形状が得られるものと予想される。

4. まとめ

本研究において以下の知見を得た。 $p-q$ 面における破壊基準は、摩擦性材料の破壊基準としてよく知られた Mohr-Coulumb 基準と類似の2つの直線で表されるが頂点は等方圧縮側に若干ずれる。 π 平面においてはLadeのパラメータに近いおにぎり型の破壊基準が算出された。 $p-q$ 面と π 平面における破壊基準の結果を総合すると、粒子破碎が生じない理想的な粒状材料の破壊基準は断面がおにぎり型の錐型になるといえる。今後、粒子間に与えるパラメータを変化させ、粒子特性と巨視的な破壊との関係を明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Kaneko, K., Terada, K., Kyoya, T. and Kishino, Y., Global-local analysis of granular media in quasi-static equilibrium, *Int. J. Solids Struct.*, 40, pp. 4043-4069, 2003.
- 2) Cheng, Y. P., Bolton, M. D. and Nakata, Y.: Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM, *Géotechnique*, Vol. 54, No.2, pp. 131-141, 2004.
- 3) Lade, P. V.: Elasto-plastic stress-strain theory for cohesion less soil with curved yield surfaces, *Int. J. Solids Struct.*, Vol.13, pp. 1019-1035, 1977.
- 4) Matsuoka, H. and Nakai, T.: Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stress, *Proc. JSCE*, No. 232, pp. 59-70, 1974.