

東北大学工学部 学生員 ○荒木 一司
同 上 正 員 佐武 正雄
同 上 正 員 岸野 佑次

1. ま え が き

粒状体の変形機構や構成方程式を微視的な観点より調べることを目的に、従来より光弾性実験を用いた2次元的なモデル実験や計算機によるシミュレーションが行われてきた。シミュレーション解析には実験では直接見ることの困難な粒子間力や微視的変形機構などについての情報が得られることや、実験では行うことが不可能な条件においても結果を得ることが容易であるなどの利点があり、粒状体の構成式を微視的な立場から考察する上で非常に有用であると考えられる。本文は、平均応力一定の条件下で、著者の一人が提案した解析法¹⁾を用いて二軸圧縮試験のシミュレーションを行い、その結果に基づき、ダイレイタンス等の変形特性に及ぼす初期異方性の影響や微視的変形機構について考察を行ったものである。

2. 解析方法の概要

図-1に本文で用いた粒子モデルにおける粒子間に作用する力の伝達特性の模式図を示す。解析の手順を簡単に述べると、粒子に作用する合力を算出し、その合力を基に定めた移動量に応じて粒子を動かす。はじめに収束条件を設定しておき、すべての粒子がその収束条件を満たすまで上記の操作を繰り返す¹⁾。

本文で用いた解析モデルは、図-3に示すように円周上に粒子を規則的に配置したものを境界としている。このような境界は、応力及び変形を方向を自由に定めることができるなど、矩形壁の境界より有利な点が多いと考えられる。このような境界を用いたときの境界の移動方法は、領域Rの境界に一樣なせん断変形を与え、その後、平均応力 $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ が一定となるまで等方的に変形を与える。ここで、応力は境界粒子に与える力を基に

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{A} \sum F_i x_j \quad (1)$$

で求める。ここに、 F_i は境界粒子に内部より作用する力に対抗する合力ベクトル、 x_j は F_i の作用点の位置ベクトル、 A は領域の面積である。

粒子パッキングの方法は、領域内に人為的に配置した粒子を重力の作用により落下・堆積させるとともに主応力 σ_1 及び σ_2 がある一定の値に達するまで圧縮し、それを初期状態とする。同一の初期状態にたいして、鉛直軸から時計回りに 0° から 15° おきに 90° まで、7種の方法から載荷させて解析を行った。

3. 解析結果及び考察

図-2に結果の一例として 0° の場合の応力比～せん断ひずみ～ダイレイタンス関係を示す。解析条件は、法線方向バネ定数 $6 \times 10^7 \text{ dyn/cm}$ 、接線方向バネ定数 $4 \times 10^7 \text{ dyn/cm}$ 、粒子間摩擦角 30° 、粒子密度 2.6 g/cm^3 、平均応力は $4 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ である。また初期状態における間隙比は約0.24であった。解析モデルは内部粒子数が103個で面積比が約1:1:1になるようにランダムに配置したものである。

図-3に初期状態及びピーク強度時における接触力の分布を示す。初期状態においては、領域の中央付近に大きな間隙があり、また領域下部は比較的密になっており、水平方向に大きい接触力が分布しているのが観察される。これは重力の影響によるものであると考えられるが、境界の形の特性により、その影響は大きいものになったと考えられる。

図-4に図-3と同様に初期状態及びピーク時における有効接触角分布を示す。有効接触角とは接触点において、力が分布している2粒子の中心間方向の単位ベクトルの水平軸からの傾きである。図中の点線は接触力が $2.5 \times 10^5 \text{ dyn}$ 以上の接触点における接触角を示している。初期状態においては上下方向に比較

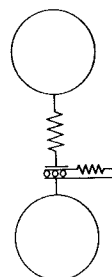


図-1 粒

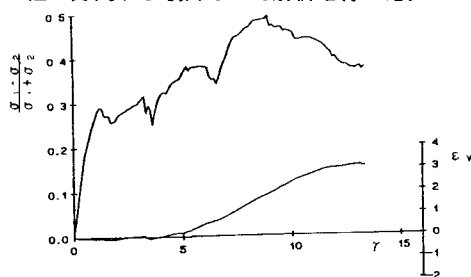


図-2 応力比～せん断至～ダイレイタンス関係

的集中している。またピーク時には最小主応力方向で大きく減少しているのが観察される。

図-5に各載荷方向に対する応力比の最大値を示す。砂の場合²⁾と同様に 60°で最小値を示しているが、砂に比べて変化の程度は小さい。これは粒子が円形であり、砂のように粒子のかみ合わせがなく比較的自由に移動できることによるものと考えられる。また、90°で応力比は最大値を示しているが、これは初期状態において水平方向に比較的大きな力が集中している領域下部において粒子移動が拘束されたことによると考えられる。異方性の応力比に対する影響は、粒子形状に起因するものが大きいと考えられるが、ここに見られるように、円形粒子であっても配列により影響が出ることが注目される。

図-6に図-5と同様に体積ひずみの最小値を示す。体積ひずみは 45°の場合に大きい減少を示している。これは初期状態に存在した大きい間隙によるものと考えられ、粒子の移動方向に間隙が存在したことにより、大きな粒子の移動が生じ、それが大きな体積減少につながったと考えられる。この例においては粒子配列による影響が応力比に比べて大きな結果となった。

図-7に W/p (W :エネルギー、 p :平均応力)とせん断ひずみの関係を示す。せん断ひずみと W/p はほとんど比例するように見える。この2つが比例するならば応力比とひずみ増分比は比例するが、図-8によれば比例するような傾向はみられるがバラツキが大きい。これは主軸の共軸性を仮定しているが、両主軸にあまり共軸性が見られなかったことによると考えられる。

4. あ と が き

以上、シミュレーション解析の結果について述べたが、この解析方法は要素試験と考えることができ用であると考えられる。今後、粒子数や粒子形状を変化させることにより、粒状体の構成式との関係について研究を進めたい。

参 考 文 献

- 1) 岸野：粒状体の新しいシミュレーション解析とその応用，土木学会年次講演会講演概要集，第3部，1986, pp. 243-244
- 2) konishi, J., Oda, M., Nemat-Nasser, S.: Inherent Anisotropy of Oval Cross-Section Rods, Mechanical Constitution of Granular Materials, 1982, pp. 33-53

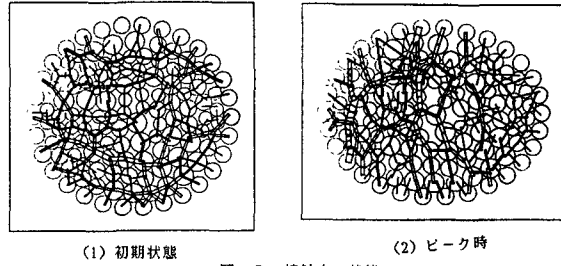


図-3 接触力の状態

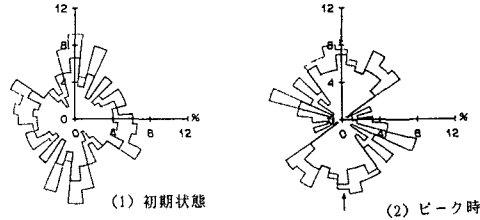


図-4 有効接触角分布

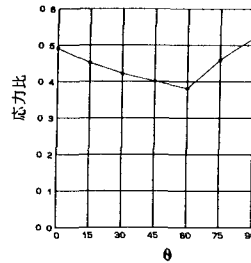


図-5 各載荷方向の応力比の最大値

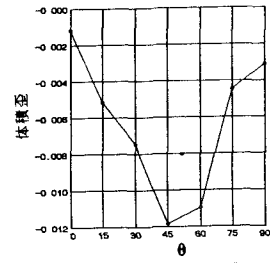


図-6 各載荷方向の体積ひずみの最小値

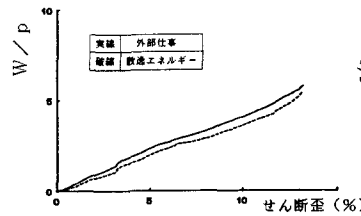


図-7 $W/p \sim$ せん断歪

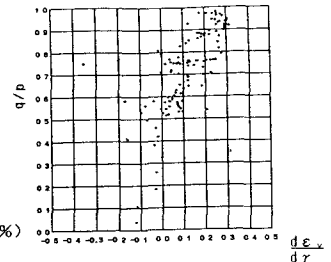


図-8 応力比～歪増分比