

III-214

シミュレーションによる主軸回転を受ける粒状体の変形特性の解析

東北大学大学院 学生員 土 倉 泰
東北大学工学部 正 員 佐 武 正 雄
東北大学工学部 正 員 岸 野 佑 次

1. まえがき：主応力方向が連続的に回転する場合の粒状体の変形特性をシミュレーションによって解析した。解析の対象とする試験は、K。圧密した粒状体に対する単純せん断試験と、主応力値を固定して主応力方向を回転させるモール応力円周上の回転試験である。本報告では、主応力方向と主ひずみ増分方向の関係について得られた結果を中心に示す。

2. 解析方法の概要：ここでは粒状要素として円を考える。粒子間にはバネとすべり要素を仮定しており、接触力は粒子の重なりに応じて算定される。解析する粒状体モデルはその境界に粒子を楕円状に配置したもので、図-1あるいは図-2に示す。図中に破線で示すのが領域の境界で、太い線で描く粒子が境界に配置した粒子である。ここで粒子間に描く矩形には接触力の大きさに比例した幅と接触 2 粒子の半径の和に等しい長さを与えている。所期の応力状態を満たすように境界を動かすと、接触力と鉛直方向（y 方向）下向きに作用する重力により成立していた各内部粒子の力の釣り合い状態が失われる。そこで各内部粒子毎に定まる接触剛性行列に基きそれぞれの粒子の力の釣り合い状態を逐次計算から求めていく。モデルと粒子の動かし方の詳細は文献¹⁾を参照されたい。境界に与えるべき変位勾配 Δe_{ij} は現在の応力と所期の応力との差を $\Delta \sigma_{ij}$ とすると、(1)式よりもとまる。

$$\Delta \sigma_{ij} = K_{ijkl} \Delta e_{kl} \quad (1)$$

$$K_{ijkl} = \frac{1}{A} \sum_B x_i k_{jkl} x_l \quad (2)$$

A : 粒状体領域の面積, $\sum_B$: 境界粒子についての和

x_i : 現在の粒子中心座標, k_{ij} : 着目する粒子の剛性行列

ただし、それぞれの境界粒子はその中心を同一の変位勾配に従って動かし、境界粒子自身に回転は与えないものとする。

解析に用いる諸定数は、粒子の単位体積重量が 1.6 g/cm^3 、粒子間バネ定数 $k_n, k_t = 1.2 \times 10^8, 8.0 \times 10^7 \text{ dyn/cm}$ 、粒子間摩擦角 25° である。粒子直径は $6, 9, 12 \text{ mm}$ （面積比 $1:1:1$ ）で内部粒子数 61、境界には 24 の粒子を配置している。なお主応力方向、主ひずみ増分方向はそれぞれ最大主応力軸、最大主ひずみ増分軸の鉛直軸からの時計回りの角度をもって β, α で表すこととする。

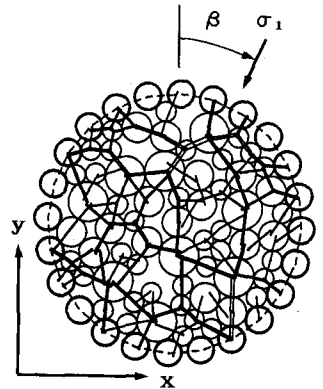


図-1 単純せん断の初期状態

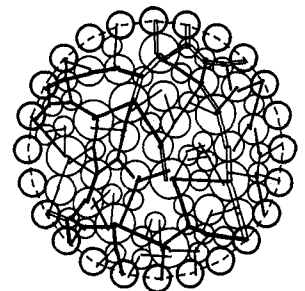


図-2 モール円上回転試験の初期状態

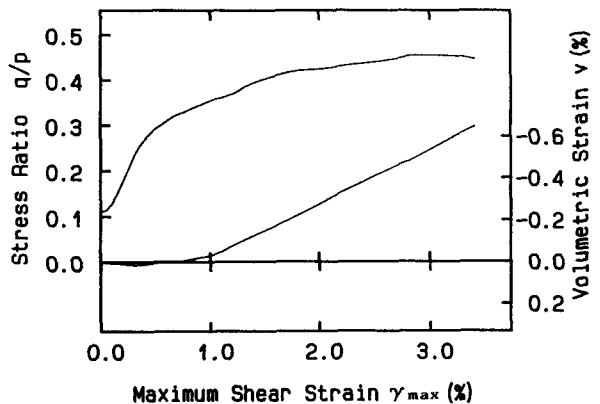


図-3 単純せん断の応力比～ひずみ関係

3. 単純せん断試験: $\sigma_y = 1.8 \times 10^5 \text{ dyn/cm}$ まで $K_0 = 0.8$ で異方圧密したモデルを初期状態として、単純せん断変形を加えた。図-1が初期状態である。変形中 K_0 値は常に一定とし、せん断応力 τ_{xy} のみが変化するように制御した。したがって最大主応力増分方向は 45° に固定される。図-3が応力比～最大せん断ひずみ～体積ひずみの関係である。応力比の下がり始めた時点で解析を終えている。この試験において、主応力方向は連続的に回転し最終的に β は 45° に近づく。図-4は主応力方向 β と主ひずみ増分方向 α の変化の様子を示している。 β の変化は変形初期に顕著であるが、その後はほとんどない。また、 α は初め β より大きくその差は $20 \sim 30^\circ$ 程あるが、 α と β は変形初期を除いてよく一致するようである。

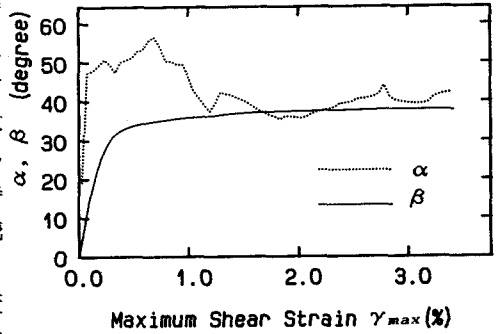


図-4 主応力方向 β と主ひずみ増分方向 α

4. モール応力円周上の回転試験: あらかじめ等方圧状態 ($2.0 \times 10^5 \text{ dyn/cm}$) にあるモデルを $\beta = 0^\circ$ でせん断した。このとき最大圧縮点に相当した主応力差 $7.6 \times 10^4 \text{ dyn/cm}$ の状態を初期状態とし、主応力値一定のまま β を 1° ずつ変化させた。図-2が初期状態である。 β が 360° になるとモール応力円を2周したことに相当する。なお解析に当たり初期状態を基準とした変位勾配テンソル e_{ij} に反対称成分は含まないものとした。図-5に β の変化に伴う各ひずみの大きさを示す。それぞれのひずみは周期的に変化している。次に図-6は β と $(\alpha - \beta)$ の関係である ($\alpha - \beta$) が 45° ならばその変形は弾性的、 0° ならば完全塑性的であるが、全般的には両者の中間にあり、周期的に変動している。 β が 45° の付近で、 $(\alpha - \beta)$ が小さくなっているのは、初期構造が崩れる際に領域全体に均一な接触構造が得られず、載荷方向の力を支えるために大きな変形を必要としたためである。これに対応して、図-5の γ_{xy} が大きく出ている。

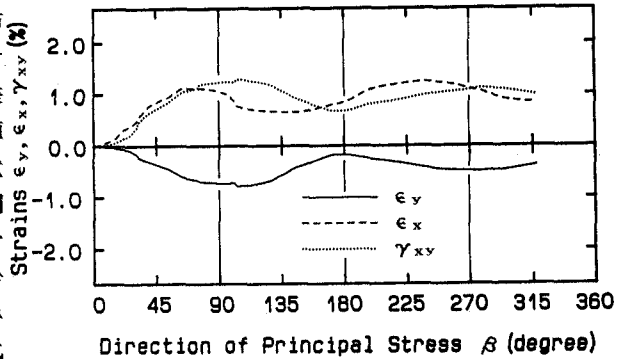


図-5 β と ϵ_y , ϵ_x , γ_{xy} の関係

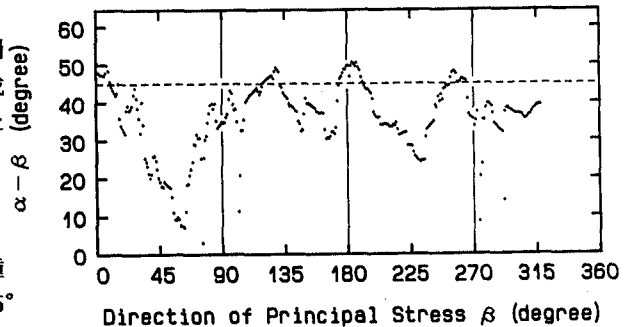


図-6 β と $(\alpha - \beta)$ の関係

5. あとがき: 主応力方向が連続的に変化する2種の試験をシミュレートし、最大主応力増分方向が 45° に固定された単純せん断試験では主応力方向と主ひずみ増分方向が最終的に一致し、最大主応力増分方向が刻々変化するモール応力円周上の回転試験では2つの方向の差は周期的に変動するという結果を得た。今後微視的側面から詳細な検討を加えたい。