

画像処理手法による粒状体の変形の解析

東北大学 工学部 正 員 佐武正雄

東北大学 工学部 正 員 岸野祐次

東北大学 工学部 学生員 ○高橋守男

1. はじめに

近來, 粒状体力学の粒子レベルでの理論的および実験的解析が種々試みられている。しかし, 微視的な個々の粒子の変形を実験的に調べることは非常に困難であると考えられる。著者らは, 画像処理システムを用いる粒子の白黒画像をもとに粒子重心の移動を自動計測することを試みた。本文は, 二次元粒状体モデルの二軸圧縮試験における写真をもとにした解析方法を示すとともに変形状態の統計的表現方法として, 一つの新しいパラメータの提案を行なったものである。

2. 二軸圧縮試験と画像処理システム

2-1. 実験方法および実験装置

図-1に二軸圧縮試験装置の平面図を示す。可動板と底板との摩擦の影響を少なくするために, 接触面にはボールベアリングを用いた。粒子モデルは, 塩ビ棒を 10^{-3} mm間隔に切断した円柱(disc)であり, 数種の径により実験を行ったが, ここでは一例として径 18^{-3} mm, 16^{-3} mm, 10^{-3} mmの粒子を面積比1:3:6の割合でランダムに混合(multi-mixed)したものについて示す。荷重はすべて鉛玉を用いた応力制御であり粒状体変形の安定時において, ダイヤルゲージにより載荷板, 拘束板の変位量を読み, 荷重を記録するとともに写真撮影を行った。なお粒子と間隙の明度差を大とするために, 実験装置は黒, 粒子は白の塗料を塗った。

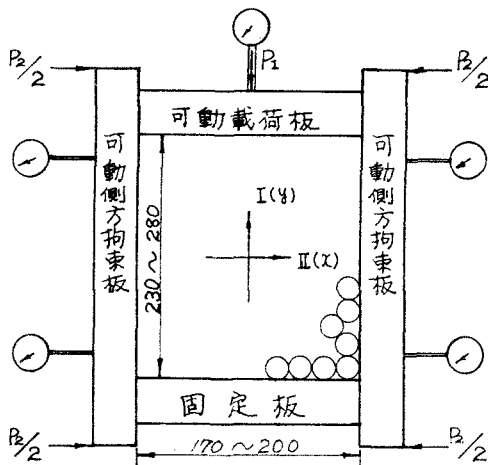
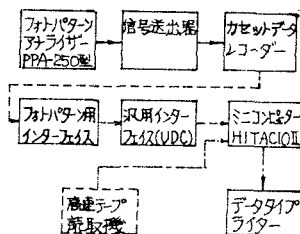


図-1二軸圧縮試験装置

単位mm

2-2. 画像処理システム

図-2に画像処理システムの構成を示す。入力装置のフォトパターンアナライザは, 機械的走査により画像濃度を読み取るものであり, 安定度, 再現性が期待できるものである。走査は写真板上におかれたフィルムを反射式によりX,Y軸両方向とも 0.1^{-3} mm刻みで行い, 画像信号をカセットテープに一旦記録する。この信号を再生しながらミニコンにより粒子または間隙の2値データに変換し順次格納する。各々の画素は1ビットで表現されるので, ミニコンでも 400×400 画素程度(メモリー12K語)の処理が可能である。格納されたデータにより2次元的位置が定まり, これをもとにして, 粒子重心位置の算出などの計算をアセンブラプログラムにより行なった。



画像処理の手順
 — 画像信号の記録
 - - - 2値データの格納
 — 画像の解析

図-2画像処理システムの構成

3. 粒子の変形の統計的表現¹⁾

2. で得られる n 番目の粒子の, 原点を規率にした位置ベクトルを $\mathbf{x}_n(x_n, y_n)$, 変位ベクトルを $\mathbf{u}_n(u_n, v_n)$ とする。なお座標軸は, 図-1に示すように試験装置の中心線に選ぶこととする。この場合, $\sum_{n=1}^N x_n y_n \approx 0$ (N は粒子の総数) (1) が成立つ。

平均的歪は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sum_{n=1}^N u_n x_n}{\sum_{n=1}^N x_n^2} & \delta_{xy} &= \frac{\sum_{n=1}^N u_n y_n}{\sum_{n=1}^N y_n^2} \\ \delta_{yx} &= \frac{\sum_{n=1}^N v_n x_n}{\sum_{n=1}^N x_n^2} & \varepsilon_y &= \frac{\sum_{n=1}^N v_n y_n}{\sum_{n=1}^N y_n^2} \end{aligned} \quad (2)$$

上式の平均的歪より期待される各粒子の変位ベクトル $\bar{\mathbf{u}}_n$ は,

$$\bar{\mathbf{u}}_n = \mathbf{E}^t \mathbf{x}_n \quad \text{但し} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \delta_{xy} \\ \delta_{yx} & \varepsilon_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。次に

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{u}_n - \bar{\mathbf{u}}_n \quad (4)$$

を偏差変位ベクトルと呼び, $\mathbf{v}_n$ をもとに dyadic

$$\mathbf{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^t \quad (5)$$

を定義すると ($\mathbf{V}$ を変形共分散テンソルと称することとする), これは, 微視的な変位の変動の統計的な表現になっているものと考えられる。

4. 解析結果と考察

写真-1およびこれを初期状態 ($P_1 = 0.50 \text{ kg}$) とし $P_2 = 3.36 \text{ kg}$, 3.67 kg ($P_2 = 0.60 \text{ kg}$) と変化させて得られる2枚の写真をもとに2. のシステムにより求めた変位ベクトルを図-3に示す。

各過程の平均的歪を表-1に, また変形共分散テンソルをモールの円で図-4にそれぞれ示す (歪は変形前を基準にとった)。結果から, $\mathbf{V}$ の主軸方向が, 載荷の方向とある角度をなしているのがわかる。粒状体の変形は, 現象的に内部の粒状体要素の剛体的変形の影響が大きいことから①においては $\delta_{xy} < 0$ を考慮しても①-2線の近傍領域が剪断領域と考えたよいと思われる。②においては, 主軸とのなす角度がほぼ零であり, x 方向に変動が集中している。これは①と対称的な位置にも剪断領域が発生したためと考えられる。なお, 表-1から求まる体積歪と主軸の傾きを比較すると, 傾きの小さいほど体積歪も小さいことを示している。

歪	①	②
ε_x	0.0178	0.0242
ε_y	-0.0354	-0.0247
$\frac{(\delta_{xy} + \delta_{yx})}{2}$	-0.0061	0.0048

表-1

このため, 粒状体の変形は, 現象的に内部の粒状体要素の剛体的変形の影響が大きいことから①においては $\delta_{xy} < 0$ を考慮しても①-2線の近傍領域が剪断領域と考えたよいと思われる。②においては, 主軸とのなす角度がほぼ零であり, x 方向に変動が集中している。これは①と対称的な位置にも剪断領域が発生したためと考えられる。なお, 表-1から求まる体積歪と主軸の傾きを比較すると, 傾きの小さいほど体積歪も小さいことを示している。

5. おわりに

粒状体の巨視的な変形において微視的な変形の変動のもつ意味は重要であると思われる。以後 $\mathbf{V}$ のもつ力学的意味をさらに追求してやきたいと思う。なお, 本研究は昭和51年度科研費(一般(D)課題番号 165107)の補助を受けたものであることを付記する。参考文献 1) 岸野佑次(1975); 微視的な変動を考慮に入れた変形の表現について, 土木学会年報概要集, I-5

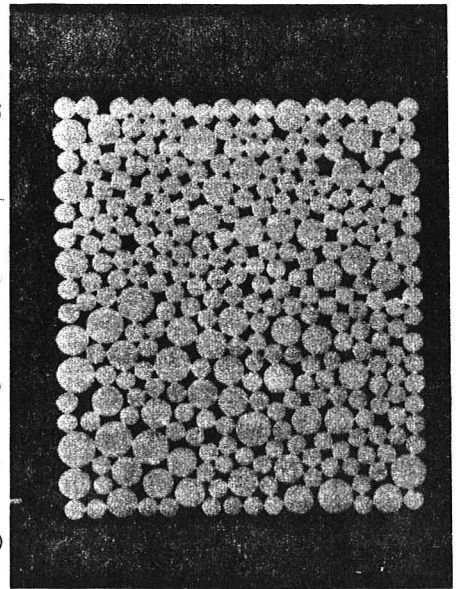


写真-1 解析画像(初期状態)

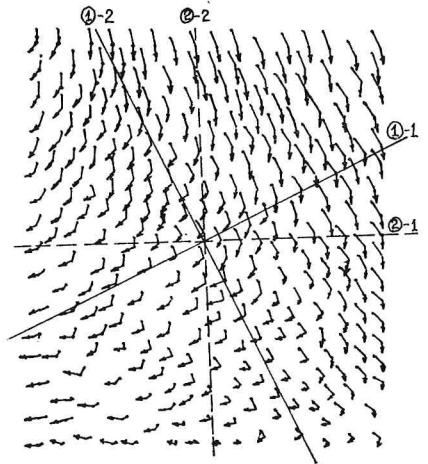


図-3 変位ベクトルと $\mathbf{V}$ の主軸

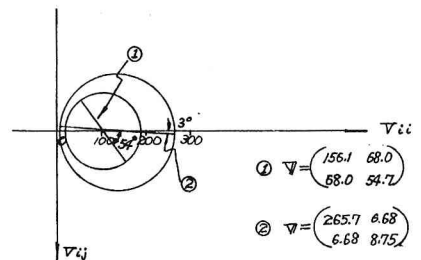


図-4 $\mathbf{V}$ のモールの円表示