

III-113 シミュレーションによる粒状体の散逸機構の解析

東北大学 正員 岸 野 佑 次

1. はじめに 本文は、著者の提案したシミュレーション法^{1), 2)}を応用し、円形粒子よりなる粒状体について散逸機構の考察を行ったものである。用いたシミュレーション法は、粒子の弾性変形を粒子接触点における線形バネに置き換えること、粒子間の滑りは Coulomb の摩擦則によること、粒子の接触状態は不釣り合い力解消のための粒子移動に伴い逐次変化すること、不釣り合い力は粒子相互の位置関係により定まる剛性行列に基づいて解消させること等を基本としている。

2. 散逸エネルギーの算定法

図-1 のように、C 点において接している2つの粒子の重心の変位増分ベクトルを Δx_i , $\Delta x_i'$, 重心まわりの回転の増分を $\Delta \omega$, $\Delta \omega'$, 単位接ベクトルを t_i とすれば、これらの粒子の接触点間相対変位は次式で与えられる。

$$\Delta u = (\Delta x_i' - \Delta x_i) t_i + (r' \Delta \omega' + r \Delta \omega) \quad (1)$$

この中、弾性的な変位は、接触力の接線方向成分の増分 ΔP_t , 接線方向バネの剛性 k_t を用いれば、次式で与えられる。

$$\Delta u_e = \Delta P_t / k_t \quad (2)$$

従って、これらの量より求まる相対的滑り

$$\Delta u_p = \Delta u - \Delta u_e \quad (3)$$

を用いて、C 点における散逸エネルギー増分は

$$\Delta D_c = P_n \tan \phi |\Delta u_p| \quad (4)$$

と表すことができる。上式中、接触力の法線方向成分 P_n は考えているステップ前後の平均値(片方の接触力が零のとき零)とする。また、 ϕ は粒子間の摩擦角である。領域内全ての接触点の ΔD_c の総和として、全体の散逸エネルギー増分 ΔD が求まる。

3. 力学的統計量の定義

P_n が零ではない接触点の単位法線ベクトル n_i について、次のファブリックテンソルを定義する。

$$C_{ij} = \{ \sum_c (\sum_c n_i n_j) \} / N \quad (5)$$

ここに、 $\sum_c$ は粒子についての和、 $\sum_c$ は各粒子の接触点についての和を表す。また、 N は領域内の粒子数である。 C_{ij} は、そのトレース C_{ii} が配位数 (coordination number) となるので、配位テンソルと称される。

次に、変形増分の分散を次のように定義する。

$$S^2 = \{ \sum_c (x_i + \Delta x_i - A_{ij} x_j - b_i) (x_i + \Delta x_i - A_{ik} x_k - b_i) \} / N \quad (6)$$

ここに、 A_{ij} 及び b_i は境界の移動増分に対応する領域の線形変換の係数、 x_i は粒子重心の位置ベクトルである。 S を変形の標準偏差と称する。

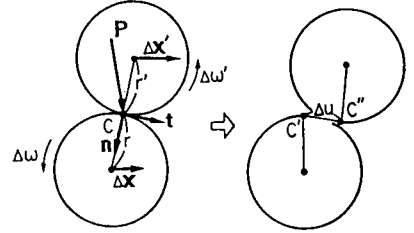


図-1 粒子間相対変位

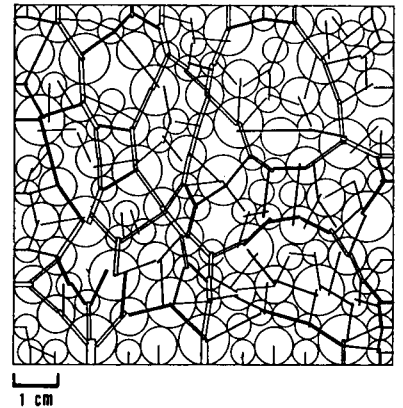


図-2 粒状体モデル

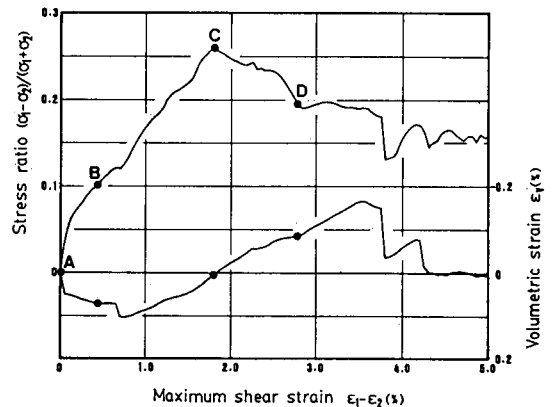


図-3 応力-歪関係

4. 解析結果とその考察

4-1 解析条件 図-2 に示した粒状体モデルについて平均応力一定の2軸剪断試験の解析を行った。粒径は6, 9, 12 mmの3種, 面積比は1:1:1である。法線と接線方向の粒子間バネ剛性は $10^8, 7 \times 10^7$ dyn/cm, 粒子間摩擦角 25° , 境界との摩擦角 0° とした。初期状態の間隙比は0.26, 拘束圧は $\sigma_0 = 1.5 \times 10^5$ dyn/cmの等方圧とした。各ステップで与えた剪断歪増分は $\Delta(\epsilon_1 - \epsilon_2) = 0.05\%$ である。

4-2 応力と体積変化 図-3 の応力-歪関係において数個所で急激な体積歪の減少が見られるが, これは局所的に接触力分布の顕著な変化を伴う構造変化のあったステップである。粒子数が増せば局所の変動が平均化されより滑らかなグラフになると思われる。図-2 にはピーク状態Cの接触力分布を示す。最大圧縮方向（縦方向）に卓越した接触力の分布が観察される。

4-3 散逸エネルギー 図-4 には境界における接触力と変位量から算定される外部仕事Wと2. において説明した散逸エネルギー増分 ΔD の積分値Dのグラフを示す。両者の差は粒子間のバネに蓄積される弾性エネルギーに相当する。弾性エネルギーも実際に算定したが, これら3者の値は数%の誤差で適合している。

4-2 に述べた体積歪の急激な減少部分を除いて散逸エネルギーは剪断歪に対して線形に変化している。

4-4 配位テンソル 図-5 に配位テンソルの主値のグラフを示した。最大主軸は最大圧縮方向に一致している。ピーク状態Cの前後において最小主値の急激な減少がみられる。これに対して, 最大主値は硬化および軟化の過程を通じて平均的に漸増している。このことから, 異方性の発達為主として最小主値の変化に依存していると言える。C点における変形機構は一種の固有現象に支配されているとも見なすことができよう。

4-5 変形の標準偏差 図-6 に3. において説明した変形の標準偏差と散逸エネルギーの増分の関係（剪断歪増分は一定）を示した。同図は, 図-3 ~ 5 中のA~Dにより区切られる3つの部分に分けて, プロットを行った。各グループ毎に原点を通る直線で近似することが可能と思われる。体積歪増分が負のA~B, 軟化状態のC~Dの順に散逸エネルギーが大きい。

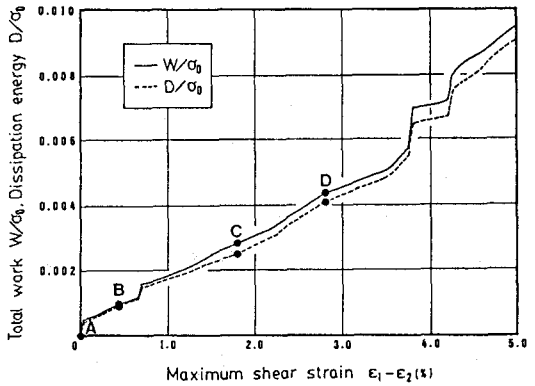


図-4 外部仕事と散逸エネルギー

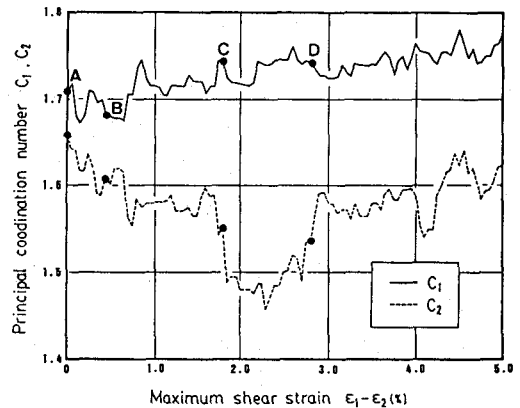


図-5 配位テンソルの主値

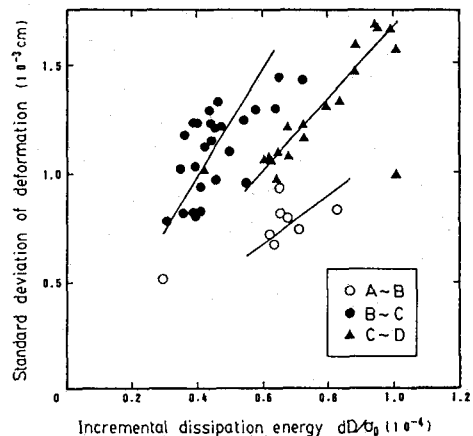


図-6 変形の標準偏差と散逸エネルギー

文献 1) 岸野：粒状体の新しいシミュレーション解析法とその応用, 第41回年次講演会, III-122 (1986) 243-244, 2) 岸野：粒子モデルによる液状化のシミュレーション, 第22回土質工学研究発表会 (1987)