

III-50

粒状要素法によるせん断帯の解析とその考察

東北大学 学生員 ○石井 建樹
東北大学 正員 岸野 佑次

1 はじめに

砂のような粒状材料の変形・破壊挙動に関して、変形が局所化しせん断帯が形成されることが知られている。このような変形・破壊挙動は微視構造における性質の変化によって説明されると考える。本研究は、粒状要素法¹⁾に周期境界を導入した方法を用いたせん断帯シミュレーション解析モデルを構築し、これを用いてせん断変形過程における微視構造特性の変化を調べ、せん断帯形成までのメカニズムを解明することを目的とする。

2 せん断帯シミュレーション解析モデル

粒状材料の準静的な微視的変形メカニズムを調べるためには粒状要素法を用いた離散解析が有効である¹⁾。しかし、ひずみの局所化問題を取り扱う上で、粒状材料の全てを離散のモデルで表すことは、ひずみが狭い範囲に集中することから考えても得策ではない。そこで本研究では、せん断帯形成の過程においてひずみの局所化が生じる部分における粒子のみを離散解析の対象とし、せん断載荷によって生じる微視構造特性の変化を調べるものとする。さらに粒状体シミュレーションにおいて周期境界となるような境界の制御を行うと、同一の粒子集合体が無限に連なっているとみなすことができ、境界条件の影響を受けにくいモデルを得る。

図1はこのような考えに基づくせん断帯シミュレーション解析モデルの概念図である。ひずみが局所化する範囲以外は剛体とし上下に配置した境界粒子同士の相対変位を拘束する。ただし、 y 軸方向の軸応力 σ_y を一定に保つように制御する。また、 x 軸方向には周期境界の考え方を取り入れた。等圧せん断の中空ねじり試験をイメージし、強制的にせん断帯を形成させるように、上下の境界粒子を x 軸方向に沿ってそれぞれ逆方向に徐々に変位させ、シミュレーション解析を行う。

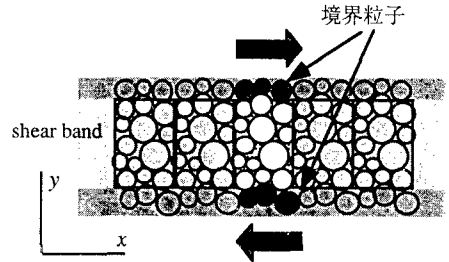


図1 せん断帯シミュレーション解析モデル

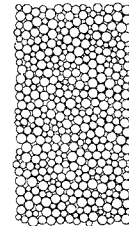


図2 粒状体モデル

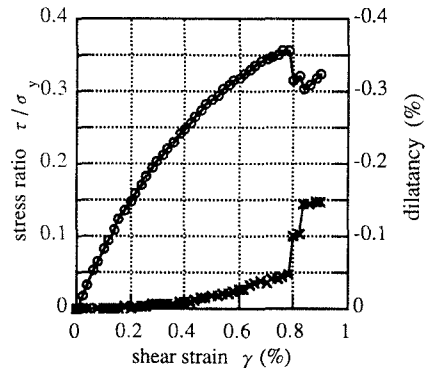


図3 応力ひずみ関係

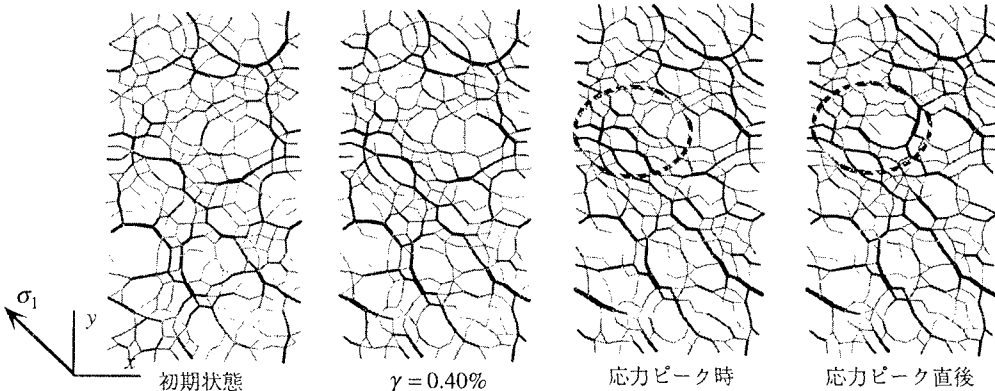


図4 接触力の伝達経路

3 セン断帯シミュレーション解析結果

図2に示すように、半径1.0cmから2.0cmまでの粒子を拘束圧3.0MPaで長方形領域にパッキングした粒子集合を供試体モデルの初期状態とする。シミュレーション解析に用いる諸定数を表1に示す。

図3にシミュレーション解析の結果得られた応力ひずみ曲線を示す。ここでは、ひずみの局所化が接触力伝達経路の発達による不安定粒子の発生に起因しているのではないかと考える。そこで接触力の伝達経路の発達状況を調べるために、初期状態、せん断ひずみ $\gamma = 0.40\%$ 時、応力ピーク時($\gamma = 0.76\%$)、応力ピーク直後($\gamma = 0.80\%$)における粒子間の接触力状態を図4に示す。より色が濃くなり線が太いほど接触力が大きいことを示している。せん断が進むにつれて最大主応力方向に接触力が網の目状に卓越していくのがわかる。さらにせん断が進み、網の目状に発達した接触力の伝達経路のうち一つの経路が粒子の移動によって弱体化するとモデルにおいて応力の低下を迎える。その後、弱体化した経路が受け持っていた力が他の経路に負担され接触力の伝達経路が再編される。図5はその様子が現れている部分を抜粋している。

また、粒子の移動量が極めて微小であるためすべり面の存在を各粒子の変位分布で確認するのは非常に困難である。そこで、各粒子の変位の速度に注目する。変位の速度が不連続であればそれに応じて生じる変位は不連続になるはずである。このシミュレーション解析の結果についてその不連続性の分布を調べたものが図6である。応力低下前の図は200倍、応力ピーク時から応力ピーク直後までの図は100倍に拡大して表している。降伏前の状態と比べると、応力ピーク時から応力ピーク直後までの応力低下の間に、突如として変位の速度の不連続面が発生している。この位置は図5に示した接触力の伝達経路の再編が行われている位置に一致している。このような不連続面の集積が巨視的なせん断帯が発生するメカニズムであると考えられる。

4 おわりに

本文では、シミュレーション解析モデルの粒子数の規模から巨視的なせん断帯の形成が確認されるまでには至らなかった。しかし、前章の結果から、接触力の網の目状の伝達経路の発達およびその再編とせん断帯内におけるすべり面の形成のメカニズムとの間には密接な関係があるということができよう。

また、接触力の伝達経路の変化を追うことですべりや粒子の回転と異なり比較的狭い範囲にすべり面形成の起因を特定することができる。ゆえに、せん断帯の形成のメカニズムを考える上で粒子の回転やすべりと同じように接触力の伝達経路も重要な意味合いを有している。

参考文献

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，No.406/Ⅲ-11, pp.97-106, 1989

表1 解析に用いた諸定数

粒子間バネ定数（法線方向）	$c_n = 1000\text{kN/m}$
粒子間バネ定数（接線方向）	$c_t = 700\text{kN/m}$
粒子間摩擦角	35.0°

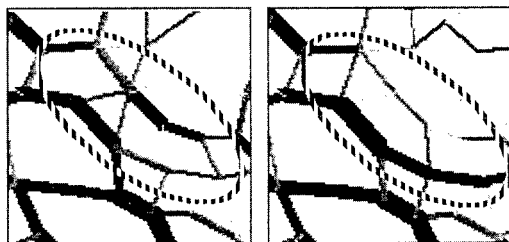


図5 降伏による接触力伝達経路の再編

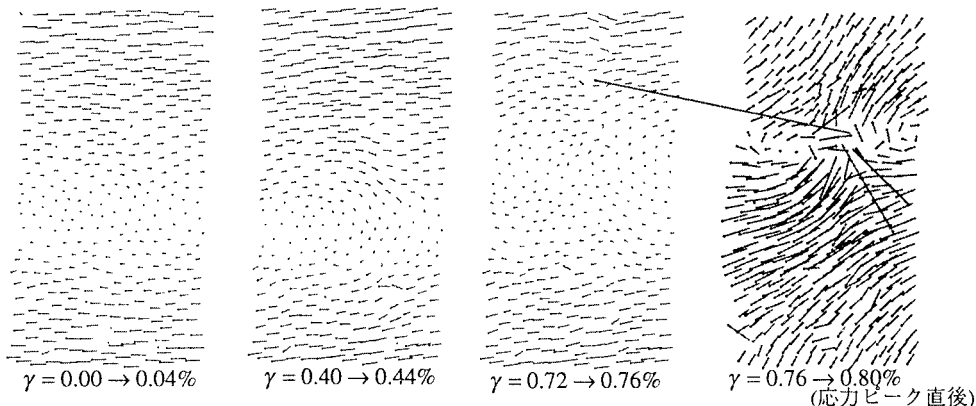


図6 モデル内における変位の速度分布