

# 粒状要素法によるせん断破壊過程の解析

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

砂のような粒状体の変形・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。本研究は、このような挙動を微視的な立場から調べることを目的として開発した粒状要素法<sup>1)</sup>によるせん断ひずみ制御試験シミュレータの概要について示すとともに、これを応用した解析例とその考察を示す。

## 2 せん断ひずみ制御試験シミュレータ

本研究ではせん断荷重による粒状体の微視的变化を調べるために、せん断ひずみ制御試験シミュレータを開発した。図-1はその概念図である。本シミュレータは中空ねじりせん断試験を想定したものであり、強制的に同図中のx軸方向(水平方向)に滑り面を発生させようとするものである。解析法には、各粒子の接触状態から定まる全体剛性行列を考慮し、静的つり合い条件を満たさせながら増分計算を行う粒状要素法<sup>1)</sup>を用いている。

上下の境界部分は剛体的に移動させることとし、単位領域の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(垂直方向)の垂直応力 $\sigma_y$ は一定値を保つように制御する。また、x軸方向は周期境界とした。これは周期境界となるような境界制御<sup>2)</sup>を行うと、同一粒子集合体が無限に連なっているとみなすことができ、比較的少ない粒子数であっても境界条件の影響を受けにくいモデルとすることが出来るためである。

なお、せん断ひずみ制御試験シミュレータの境界を除く粒子の移動等に関する取り扱いとは従来の粒状要素法<sup>1)</sup>と同じである。

## 3 せん断ひずみ制御シミュレーション試験

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0.3MPaでパッキングした粒子集合を単位領域粒状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。また、図-4に荷重段階による対象領域内に蓄えられる弾性エネルギーの推移を示す。ここに、弾性エネルギーは1接触点あたりに蓄えられる平均の弾性エネルギーで表している。応力ひずみ曲線においては、荷重段階においてそれほど大きな変化を生じていない。しかし、弾性エネルギーの推移において、せん断荷重が進むとB、C点のように急激な変化を生じる荷重段階が現れる。このことから、せん断が進むにつれてB、C点において何らかの微視的变化が生じているものと考えられる。

そこで、A点とB、C点における微視的变化を調べる。図-5に粒子間接触力の増減量を示す。線の太さが太いほど接触力増減量が大きいかを示し、暗色の線が増加、明色の線が減少を表す。さらに、図-6に各粒子の移動ベクトルの分布を示す。

図中の移動ベクトルは200倍にして示してある。これら図-5、6の変化量はせん断ひずみが0.02%増加する間の変化量を示している。せん断荷重のあまり進んでいないA点と比較すると、B点においては粒子間接触力、粒子の移動とともに局所的で大きな変化が生じている。さらにせん断荷重が進んだC点においては、より広範囲で粒子間接触力

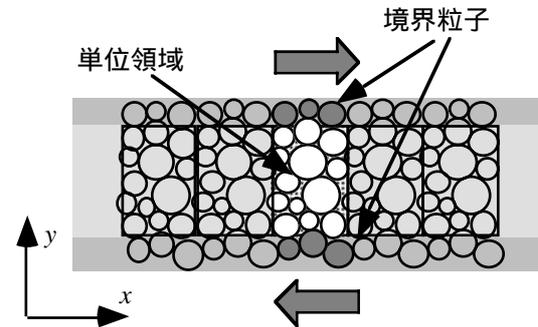


図-1 せん断ひずみ制御試験シミュレータ概念

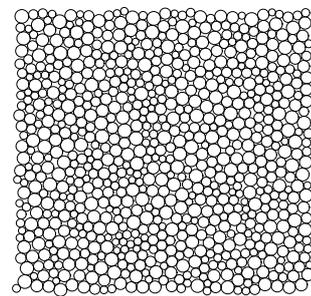


図-2 単位領域粒状体モデル

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	$35.0^\circ$

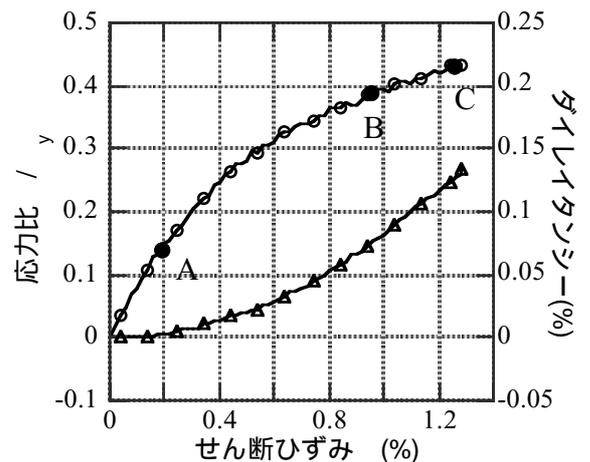


図-3 応力ひずみ曲線

キーワード：粒状体，粒状要素法，せん断破壊，周期境界

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

TEL 022-217-7425

伝達経路の急激な弱体化が生じ、領域全体での大規模な粒子移動が見られる。また、図-7に領域の平均的ひずみからのずれを表す指標として用いた粒子移動の分散  $T$  の変化を示す。粒子移動の分散  $T$  は次式で与えられる。

$$T = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\sqrt{E:E}} \sum u^* \cdot u^*$$

ここに、 $N$  は粒子数、 $\sqrt{E:E}$  は平均的ひずみのノルム、 $u^*$  は各粒子の変位増分ベクトルの平均的ひずみにより定まる変位増分ベクトルとの差、 $\Sigma$  は領域内の粒子に関する和を表す。同図より、B、C点において平均から大きくずれた変形が生じていることがわかる。

以上ことから粒子間接触力伝達経路の形成と局所的弱体化という現象の集積がせん断破壊の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、せん断過程において応力ひずみ曲線に現れない粒状体内の微視的变化が確認された。粒子間接触力伝達経路とせん断破壊のメカニズムの間には密接な関係があるということができよう。

#### 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/ -11，pp.97-106,1989.
- 2) 金子賢治，岸野佑次，林直宏，京谷孝史：粒状要素解析による地盤損傷モデルの定式化，応用力学論文集，JSCE，Vol.2,pp.427-438,1999.

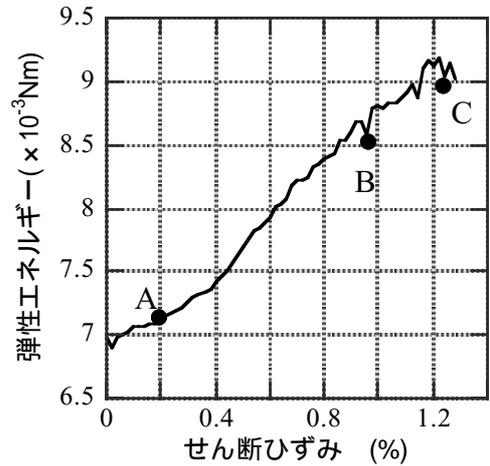


図-4 領域内の弾性エネルギーの推移

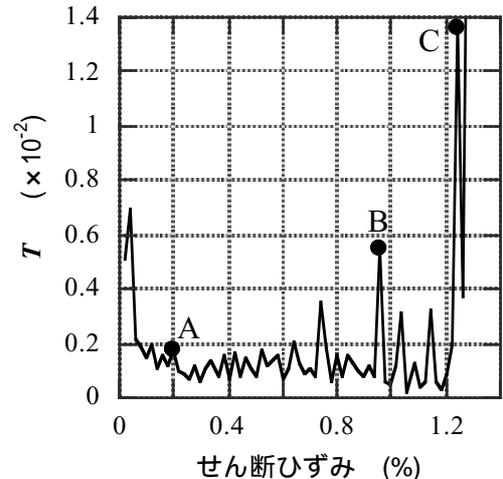


図-7 粒子移動の分散  $T$

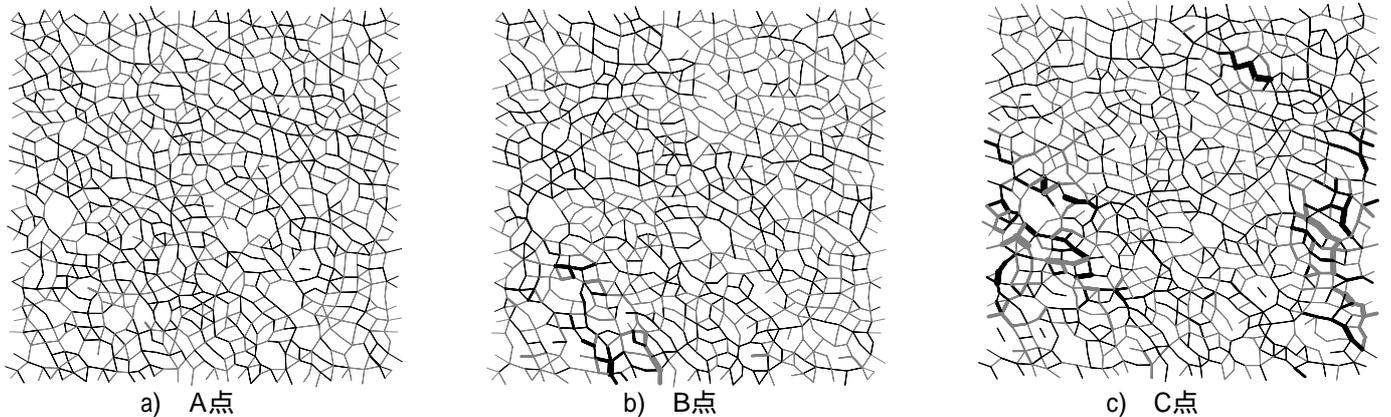


図-5 接触力の増減量 (線の太さ：増減量，明色：減少，暗色：増加)

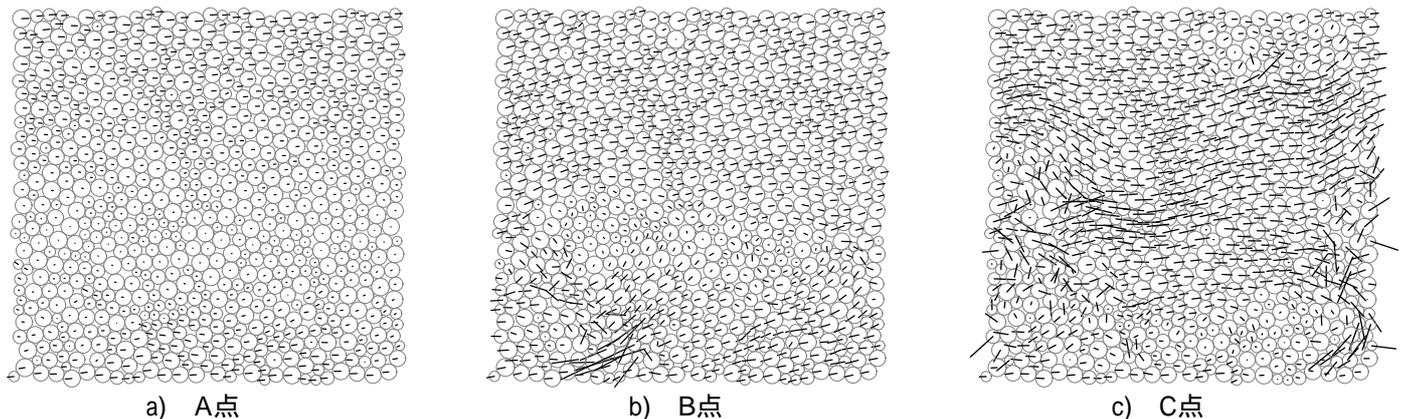


図-6 粒子の移動 (実際の移動量の200倍で表す)