

DEMによる一面せん断試験下の粒状体の進行性破壊とダイレイタンシー特性の把握

長崎大学 学生員 ○濱崎 正一 正 員 棚橋 由彦
鳥取大学 正 員 西村 強 正 員 木山 英郎

1. はじめに

不連続体を取り扱う1手法として、カンドル(Cundall,P.A.,1971)の提唱した個別要素法(Distinct Element Method、以下DEMと略称)りがある。この手法は、連続体解析手法では困難であった、砂等の粒状体や亀裂性岩盤など、不連続体の動的挙動を取り扱うのに適している。近年、この特徴を生かし粒状体に関する研究が数多くなされ、その有用性が確認されている。本研究では、この手法を用いて一面せん断試験をモデルとし、粒状体の進行性破壊を観察するとともに、ダイレイタンシー特性について検討する。

2. DEMの概要

DEMでは、各要素を剛体とみなし、要素間にフオークト(Voigt)モデルを挿入することで表現する(図1参照)。これは、要素変位及びそれによって引き起こされる要素間接触力を、運動方程式の時間差分によって各時間毎に追跡していくもので、時間依存の問題に有効である。

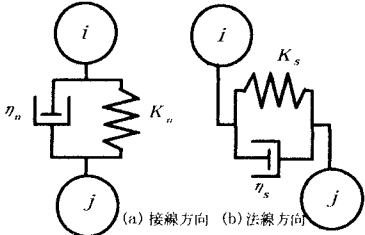


図1 要素間モデル

3. 一面せん断試験

3.1 実験の概要

本実験は、通常的一面せん断試験装置を用いて、球形ガラスビーズ(粒径 $D=3.0\text{mm}$ 、均等係数 $U_0=1$)のみの定圧せん断試験を行った。せん断容器等は、解析との比較を考慮し、表1の様に設定した。なお試料は、比較的密に充填したものと疎なものの2種類とした。

表1 実験条件	
せん断容器	直径: 6cm 高さ: 3cm
せん断速度	1mm/min (0.00167cm/s)
上載荷重	0.14, 0.28, 0.56kgf/cm ²

3.2 解析モデル

等粒径円形要素とし、DEMを用いて定圧一面せん断試験を行った。解析を行う際のせん断速度は1cm/sで、せん断容器の大きさは底辺40cm、高さ20cmの単位幅あたりとした。これは実際の試験装置の20/3倍であり、先に述べたせん断速度はこの場合0.15cm/s(粒径3.0mm)となる。DEMに用いた諸定数を表2.3に示す。表3中の※で示す値は、せん断箱のダイレイタンシーに伴う周面摩擦を軽減させるためのものである。解析過程は、初期配列時に発生する粒子浮遊状態から、静止状態を得た後、所定の上載荷重(0.1,0.2,0.4kgf/cm²)を載荷し(圧密過程)せん断する(せん断過程)。

表2 解析に用いた諸定数²⁾

要素半径, r	1.0cm
土粒子の密度, ρ	2.65gf/cm ³
ヤング率, E	750kgf/cm ²
ポアソン比, ν	0.3

3.3 一面せん断試験の結果

(a)実験と解析の比較

実験と解析では、試験装置等の理由からひずみ条件を異にする。

したがって、定量的な評価は困難であり、定性的な評価にとどまる。図2は実験(0.14kgf/cm²)によるせん断応力, τ 、体積ひずみ, ϵ_v と相対変位, D の関係を示す。図3は、同様に解析結果(0.1kgf/cm²)を示したものである。実験結果(図2)に見られる、密な場合の脆性破壊の傾向及び緩い場合の延性破壊の傾向が、解析結果(図3)にもあらわれている。体積ひずみ, ϵ_v は、実験の場合、一般的傾向を顕著に表しているのに対し、解析の場合はそれほど表れてない。しかし、傾向的には等しいと言える。紙面の都合上図は省略するが、体積ひずみ, ϵ_v が応力比, η により一義的に規定されるという一般の傾向も捉えている。

表3 材料間定数²⁾

	粒子間	粒子-境界間
K_n/ρ g (cm)	3.64×10^4	7.28×10^4
η_n/ρ g (cm/s)	1.53×10	3.06×10
K_s/ρ g (cm)	0.91×10^4	1.83×10^4
η_s/ρ g (cm/s)	0.76×10	1.53×10
Δt (s)	1.00×10^{-4}	
内部摩擦角, ϕ	30°	45°, 5°※

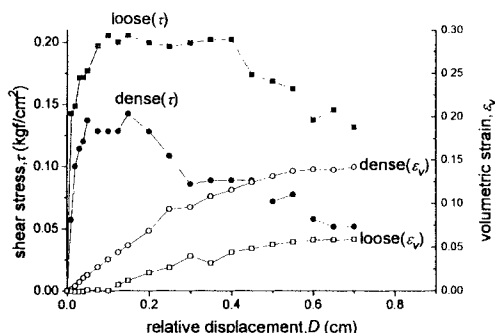


図2 τ, ϵ_v と D の関係 (実験結果, 0.14kgf/cm²)

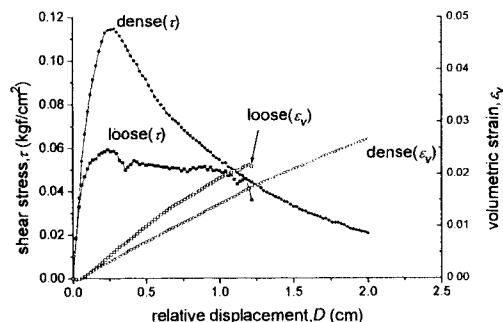


図3 τ, ϵ_v と D の関係 (解析結果, 0.1kgf/cm²)

(b)進行性破壊

図4に密配列 (0.1kgf/cm²) の圧密終了時及び相対変位, $D=0.4$ cm 毎の変形図を示す。せん断が始まると図5(図4の黒色要素に対応)の斜線部分の接触力が減少し、さらには消滅する。この過程ですでに、局所的な破壊が生じていると言える。その局所破壊が内部へ進行しせん断面を形成する。

(c)ダイレイタンスー

せん断変形に伴う体積膨張 (正のダイレイタンスー) は、せん断面形成に関与する粒子の乗り越え量に起因すると言える。ここに乗り越え量とは、図6に示すような粒子 i, j 間にせん断力が作用し、 i が j を乗り越えるときの変化量, d のことを指すものとする。完全に乗り越えた場合の d を d_{max} とすれば、 d_{max} を静止時の粒子間接触角、 α と粒子半径, r で表すと、

表4 d_{max} 及び膨張量

d_{max}	0.635cm
膨張量	0.433cm

$$d_{max} = 2r(1 - \cos \alpha)$$

となる。今仮に疎配列を例として d_{max} の計算及び解析結果から膨張量を読み取ると表4のようになる。 d_{max} が過大に見積もるのは、上式が1つのせん断面のみで考えているため、内部に生じる収縮現象等を捉えきれないためと考えられる。

4. まとめ

本報告で用いた等粒径円形要素の規則配列は、粒状体を取り扱う上で最も単純なモデルであるが、その挙動を十分シミュレートできる。また、(c)に述べたようにダイレイタンスーは、粒状体の充填状態 (間隙、粒子間接触角、 α 等) やせん断面発生位置の影響を受ける。したがって、せん断帯形成について把握しておくことも必要となる。今後、平面ひずみ試験とそのDEM解析を行い、せん断帯の生成過程の把握に努める所存である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. : A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp129~136, 1971
- 2) 木山英郎・藤村 尚・西村 強 : せん断モデルを用いた離散剛要素法の材料定数の検討, No.382, pp167~174, 1987

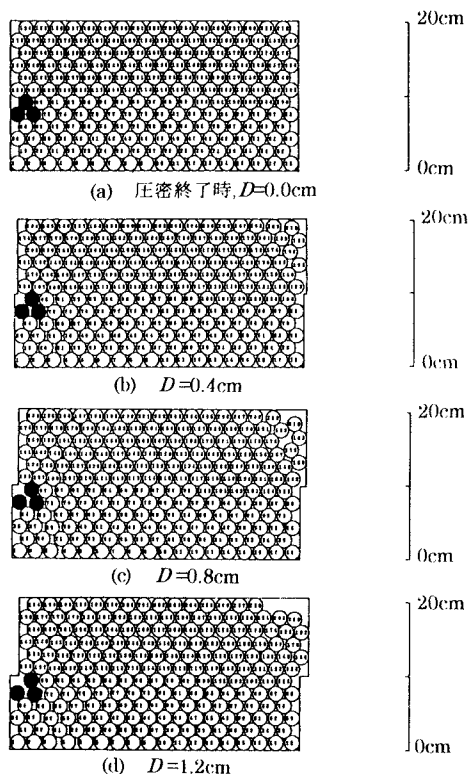


図4 変形図 (密配列, 0.1kgf/cm²)

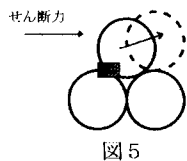


図5

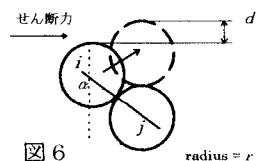


図6

radius = r