

粒状体の動的せん断特性の解析

前橋工科大学 学生会員 ○富山 真明
前橋工科大学 フェロー会員 岸野 佑次

1. はじめに

粒状体のせん断流れに関して、Bagnold¹⁾は先駆的な実験的ならびに理論的研究を行った。また、Campbell²⁾は粒状体モデルによるせん断シミュレーション試験を行なった。粒状体は粒子密度によって異なった特性を示すため、動的挙動の全体像の把握には困難を伴うが、数値シミュレーションは広範囲に亘るパラメトリックな解析を可能とする。ここでは、動的粒状要素法³⁾を用いて粒子密度ならびにせん断速度を広範囲に変化させて行った動的せん断シミュレーション試験の結果とその考察を示す。

2. 単純せん断シミュレーション試験

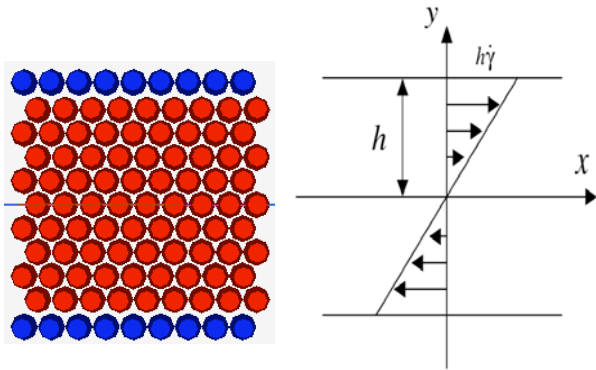


図-1 解析に用いた粒状モデルと平均的速度場

図-1に示すように、等粒径の球を平面上に並べた供試体を用いて動的単純せん断試験を行った。粒径は0.5mm、せん断領域に含まれる粒子の個数は99個とし、上下の境界の間隔を変えることにより密度を変化させた。粒子の単位質量は1000kg/m³、接触点における法線方向および接線方向のバネ定数は、それぞれ、10⁷N/m、7×10⁶N/mとした。試験は上下の境界粒子に水平方向逆向きに一定速度の運動を与える等速単純せん断とした。せん断速度は $\dot{\gamma} = 0.1 \sim 10 \text{ sec}^{-1}$ の範囲の5ケース、粒子充填率は最密状態の充填率 $v_{\max}$ に対する面積比で $v/v_{\max} = 0.5 \sim 0.9$ の範囲の5ケースの計25ケースとした。なお、解析の初期条件として、内部粒子に

運動を生じさせ、境界と衝突を生じさせるために上下方向の小さな初速度を与えることとした。数値解析における1ステップの時間は10⁻⁴秒とし、せん断ひずみが16000になるまで続けた。

解析結果より抽出した力学量の中、以下に引用するものは、境界粒子に作用する接触力より算定したせん断応力、個々の粒子のもつ運動エネルギーの総和、ならびに、次式で定義されるレイノルズ応力である。

$$\tau^R = -m \sum \Delta v_2 \Delta v_1 / V \quad (1)$$

ここに、 m は粒子質量、 V は領域の体積、 Δv は図-1に示した期待される平均的な速度場からの偏差速度成分、和は内部粒子全体の和を表す。

3. 解析結果

境界粒子に作用する接触力をもとに算定される応力をはじめとする力学量は時間的に大きな変動を伴った量である。また、载荷初期の過渡的な区間における変化は著しい。そこで、比較的变化のスムーズな運動エネルギーに着目し、この値がほぼ一定となる状態を定常状態とみなすこととすると、後半は後に述べる特殊な場合を除いて定常状態とみなすことができるので、以下に示す諸力学量は全てこの区間に亘る平均として求めた。

図-2に、さまざまな充填率に対するせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を示す。この図より、両者の関係は非線形であり、粘性流体とは異なる挙動を示している。Bagnoldは、粒子の2体衝突理論に基づき、せん断応力とせん断ひずみ速度の関係は、次式のような2乗比例型であると結論づけている。

$$\tau = a \dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

図-2には、この式でフィティングを行った曲線を実線で示した。上式の a の値をせん断速度 $\dot{\gamma} = 10 \text{ sec}^{-1}$ の場合について求めたものが図-3である。同図より、充填率が0.8より小さな範囲では a の値が

キーワード 粒状体、粒状要素法、充填率、動的せん断、運動エネルギー、レイノルズ応力、結晶化

一定の傾向をもって変化しているのに対し、0.9 の場合は全く異なる挙動を示した。これは、密に充填された粒子集合体においては粒子間の噛み合わせが生じることによる。

図-4 に各充填率に対する粒子一個あたりの運動エネルギーの変化を示したが、この図よりわかるように、充填率が 0.9 の場合は運動エネルギーが他に比べて極端に小さく、粒子の運動が限定的であることがわかる。実際、粒子運動を動画で見ると、せん断が片側の境界部分に局所化するとともに、他端の境界と全ての内部粒子とが一体化する、いわゆる結晶化が観測された。

図-5 に充填率とレイノルズ応力-せん断応力比の関係を示す。この図よりわかるように、両者はほぼユニークな曲線に載っており、両者の関係がせん断ひずみ速度に依存しない特性であることがわかる。レイノルズ応力は、図-1 に示した平均流れ場からの偏差速度ベクトルの 2 つの成分間の共分散に相当する量であるが、この量に充填率にのみ関与する係数を乗じることによりせん断応力が求まることは注目すべきことと思われる。

なお、同図において、充填率が 0.75 で全体の傾向から外れる部分が生じた。これは平均化を行った区間において、上下の境界の間を連ねるような粒子の並びが瞬間的に形成され、定常状態が崩れたことによる。このように、粒状体の流れにおいては、その粒子性に起因する構造が偶然形成されることも特徴の一つと考えられる。

以上、粒子充填率により、粒状体の動的せん断特性が種々変化することを示したが、このことは流体にはみられない特性である。

参考文献

- 1) Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proc. Royal Soc. London, Ser.A* 225, pp.49-63, 1954.
- 2) Campbell, C. S. and Gong, A.: The stress tensor in a two dimensional granular shear flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.164, pp.107-125, 1986.
- 3) 山本雄介・岸野佑次・石井建樹・京谷孝史: 粒状体のせん断流動における遷移現象の解析, 応用力学論文集, Vol.8, pp.23-30, 2005.

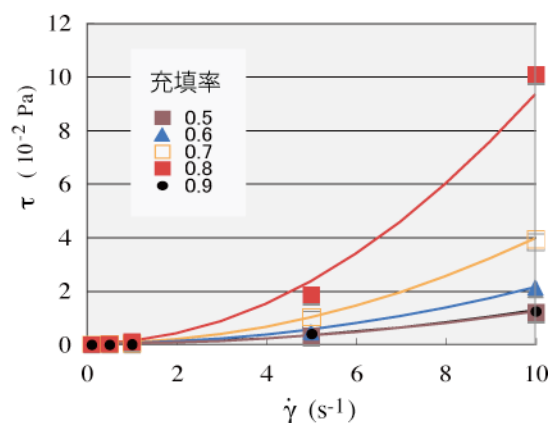


図-2 せん断速度とせん断応力の関係

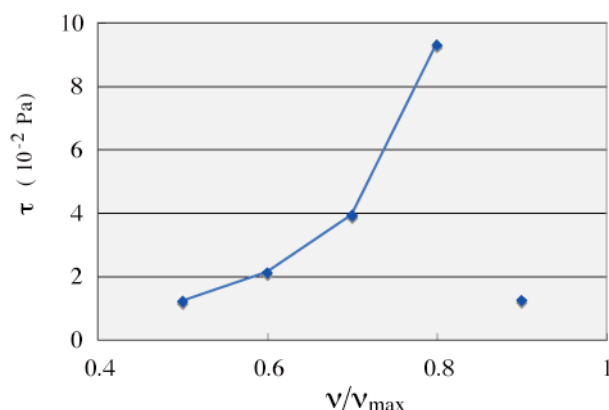


図-3 式(2)の定数 a の値

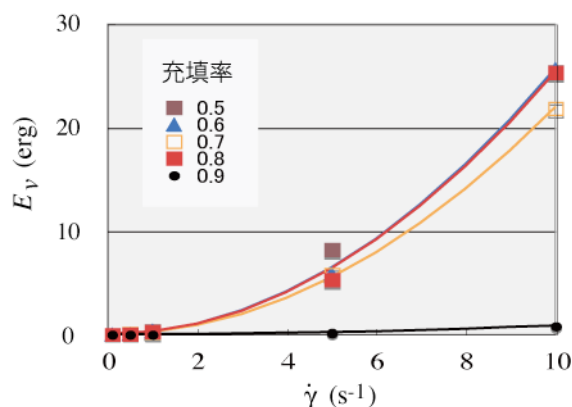


図-4 せん断速度と運動エネルギーの関係

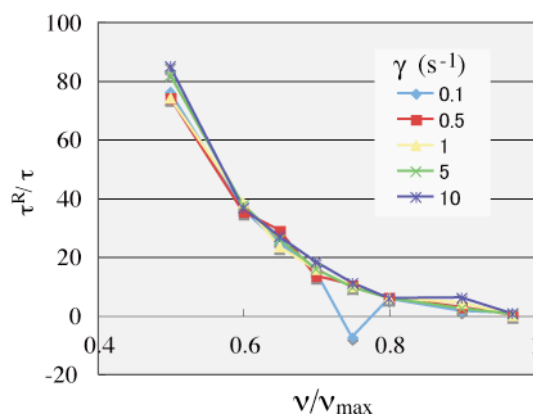


図-5 充填率とレイノルズ応力-せん断応力比の関係