

III-33 シミュレーションによる粒状体の動的せん断特性の研究

東北大学 学生会員 ○宮崎秀一
 東北大学 フェロー 岸野佑次
 東北大学 学生会員 郷春羅
 東北大学 正会員 石井建樹

1. はじめに

粒状体の流れの現象におけるメカニズムは複雑であり、従来より様々な議論がなされているが、まだ未解明な問題が残されている。とくに、せん断速度の粒状体の力学特性への影響については定体積条件や定常性の条件が満たされない場合、複雑に変動するしたがって、より広範な条件下で動特性の検証が必要である。

そこで、本研究では3次元動的粒状要素法²⁾を用いて、粒状体せん断流れの解析を行い、粒状体せん断を伴う動的力学特性について考察する。

2. 粒子集合体のせん断流動数値試験

本研究では数値試験に基づいて考察を行う。供試体モデルは、図-1に示すTsaiのせん断試験装置³⁾をモデル化したものを用いる。図-2に示すように x 方向に周期境界制御、 y 方向に平板の制御を行い、 z 方向には天板に拘束圧を与えた状態でせん断速度を与える。供試体には拘束圧を0.1kPa、1.0kPa、2.0kPa、6.0kPa、10kPaの5段階に設定し、天板を2mm/s、10mm/s、20mm/s、200mm/sの4段階で動かした。

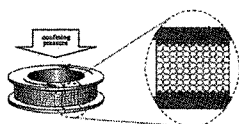


図-1 Tsaiのせん断試験装置

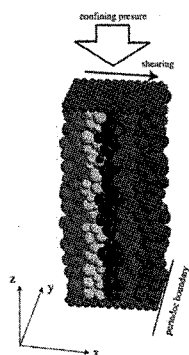


図-2 供試体モデル

3. 解析結果とその考察

拘束圧とせん断速度が高さ方向の速度分布に与える影響を調べるため、 x 方向成分の速度分布の一例を図-3に示す。横軸は供試体の高さ、縦軸は内部粒子の供試体内部を層毎に分けて求めた平均速度である。ここで、速度勾配とは速度が線形的に増加するときの勾配と定義する。図より、領域内部には平均速度の速度勾配が異なる2つの領域が存在する。このことから、供試体内部を2つの領域に分けて考える必要がある。

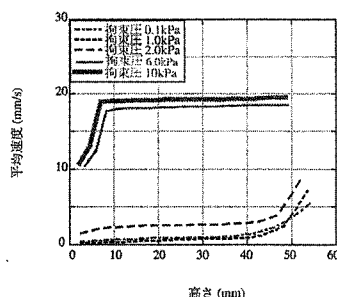


図-3 速度分布の一例（せん断速度20mm/s）

4. 動的せん断特性の考察

供試体内部で速度勾配の大きな領域に着目し、粒状体の流れのせん断特性について考察する。

(1) ひずみ速度によるせん断応力の評価

図-4は、ひずみ速度とせん断応力の関係を示したものである。なお、ひずみ速度 v を次式で定義する。

$$v = \frac{du}{dy} \quad (1)$$

ここに、 du は領域上部と領域下部の相対速度、 dy は領域の高さである。拘束圧6kPa、10kPaの場合、ひずみ速度が増加するにつれて、せん断応力が増加していく。これより、内部粒子の動きはひずみ速度に依存した挙動していると言える。一方、拘束圧0.1kPa、1.0kPa、2.0kPaの場合、内部粒子のひずみ速度の値によらず、せん断応力はほぼ一定の値となっており、せん断応力はひずみ速度に依存せず拘束圧にのみ依存している。

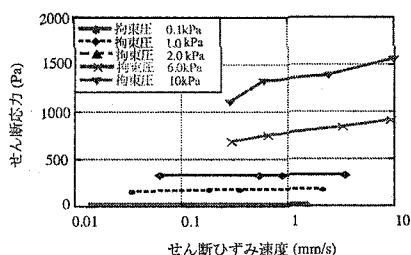


図-4 せん断応力-せん断ひずみ速度関係

よって、せん断応力とひずみ速度の関係は、拘束圧の大きさにより異なるということが分かった。

(2) 拘束圧が及ぼすせん断特性への影響

図-5は、拘束圧とせん断応力の関係を示したものである。拘束圧0.1kPa, 1.0kPa, 2.0kPaの場合、せん断応力は拘束圧にのみ依存することからせん断応力は天板と領域内部の粒子のせん断摩擦抵抗力としてみる事ができる。そこで、図-5に、拘束圧0.1kPa, 1.0kPa, 2.0kPaの各点を通る直線を引いてみる。この直線は、粒状供試体を固体と見なした場合に、本来持っている固有のせん断摩擦抵抗力とみることができる。これより、拘束圧が高い場合は、いずれのせん断速度の場合でも直線よりも下にプロットされ本来持つ固有のせん断摩擦抵抗力よりも小さくなる。図-6は、拘束圧と体積密度の関係を示したものである。拘束圧6.0kPa, 10kPaの場合の体積密度の値は、他の拘束圧の場合より小さな値を示している。

これらのことより、拘束圧が高い場合には領域内の体積密度が減少し、粒子同士の接触が少なくなりせん断応力値が図-5の直線よりも下にプロットされると考えられる。また、体積密度が領域内部の挙動を変化させる要因になっていると考えられる。

(3) 加速度の共分散による評価

領域内の個々の粒子が持つ加速度 $\mathbf{a}$ とし、加速度共分散テンソル $\mathbf{V}$ を以下のように定義する。

$$\mathbf{V} = \frac{1}{V_p} \mathbf{a} \otimes \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x a_x & a_x a_y & a_x a_z \\ a_x a_y & a_y a_y & a_y a_z \\ a_x a_z & a_y a_z & a_z a_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

各ケースにおけるそれぞれの $\mathbf{V}$ を算出する。また、平均的な挙動の比較を行うため、各成分の時間平均 $\bar{\mathbf{V}}$ を求め評価する。

図-7は、拘束圧10kPaの場合の各成分値を表したものである。いずれのせん断速度の場合でも、 zz , zx の値が他の成分より大きな値をとる。これより、この

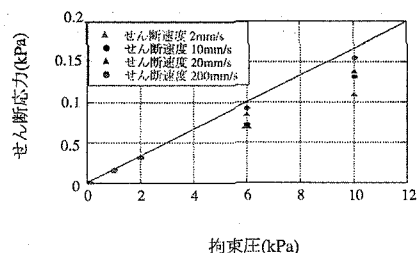


図-5 拘束圧-せん断応力関係

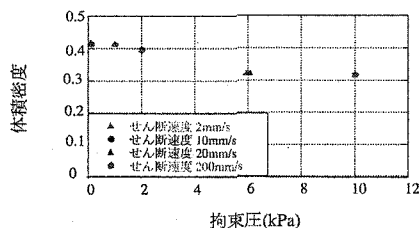


図-6 拘束圧-体積密度関係

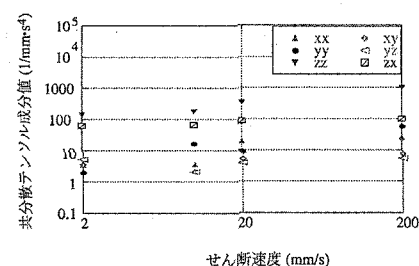


図-7 加速度共分散テンソル (拘束圧10kPa)

領域では内部粒子の z , zx 方向の動きが他の方向よりも激しく、粒子が粒子を乗り越える動きが多くなっていると考えられる。また、せん断速度による各成分の値の変化を調べてみると、せん断速度が大きくなるにつれて zz , zx の値が大きくなることが分かる。せん断速度の増加に伴い内部粒子の zz , zx 方向の加速度の増加が、せん断応力の増加の原因になっていると考えられる。

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. Lond., Ser. A 225, pp.49-63, 1954.
- 2) Kishino, Y.: Granular flow simulation by granular element method, Slow Dynamics in Complex Systems (Eds. M. Tokuyama & I. Oppenheim), American Institute of Physics, pp.466-467, 2004.
- 3) Tsai, J.-C. and Gollub, J. P.: Slowly sheared dense granular flows: Crystallization and nonunique final states, Phys. Rev. E 70, 031303, 2004.