

シミュレーションによる粒状体の動的せん断特性の解析

前橋工科大学 学生会員 ○若林 亮
 前橋工科大学 学生会員 樺澤 辰吾
 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

地盤の変形特性や破壊メカニズムに関する研究は、主として巨視的な応答を連続体的に評価することによって進められてきた。しかし、地盤材料は微視的には土粒子などを含む不連続体であり、その力学特性は粒子レベルの微視的挙動の解析によって、より本質的な把握が可能になると考えられる。そこで本研究では、微視的な立場から動的粒状要素法¹⁾に基づき、様々な密度をもたせた粒状体モデルによる単純せん断試験のシミュレーション解析を行い考察した。

2. 単純せん断試験のシミュレーション

本研究では図-1 に示すような体積変化の起こらない単純せん断流れを対象とする。単純せん断流れ場は上下の平行性を保ったまま逆方向に一定速度を与えて上下端には境界粒子を並べ、内部粒子にせん断が伝わるように配慮する。また x 方向は周期境界とする。

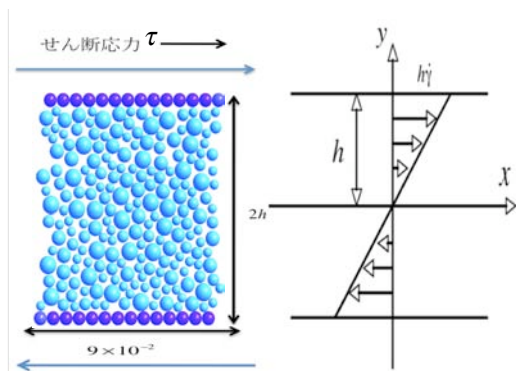


図-1 供試体モデルと平均的速度場

図-1 のような供試体を用いて動的単純せん断試験を行った。上下には粒径 0.01 の境界粒子を 28 個並べた。内部粒子の粒径は 0.013、0.011、0.009、0.007 の 4 種で、各 27、36、54、90 個、計 207 個が含まれている。密度は上下の境界の間隔を変えることにより変化させた。内部粒子の個数は内部粒子の粒径の面積比がほぼ一定になるように定めた。密度を供試体モデルの領域の面積 (x 軸方向周期長 $\times$ 上下の境界粒子の中心線を結んだ長さ) とその領域内の粒子の面積の比と定義する。粒子の密度は 1000 kg/m^3 、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 1×10^7 、 $7 \times 10^6 \text{ N/m}$ とした。

試験は上下の境界粒子に水平方向逆向き一定速度の運動を与える等速単純せん断とした。密度は 0.3~0.7 までの 0.05 刻みの 9 ケース、せん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) を 1~100 までの 10 刻みの 11 ケースとし、計 99 通りのデータについて解析を行った。さらに、この解析により得られたグラフで、値が急激に大きく変化している箇所に着目し、せん断ひずみ速度 0~10 を 1 刻み、10~40 の間を 3 刻みで解析した。

なお、解析の初期条件として、境界との衝突を生じさせるために内部粒子に、上下方向に小さな初速度を与えることとした。シミュレーション解析においては、密度の違いによる内部粒子の挙動の把握、境界に作用する応力や、レイノルズ応力などの力学量の算定を行った。

3. 解析結果

解析で得られた密度によるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係の変化を図-2 に示す。同図より、各密度ともにあるせん断ひずみ速度に達すると、急激にせん断応力の減少が見られた。また、図-3 は典型的な粒子の挙動を 2 つのせん断ひずみ速度について示したものである。せん断ひずみ速度の速い (2) の場合、中心付近にクラスタリングが起きていることがわかる。次に、せん断ひずみ速度の小さい場合を取り出して行った詳細な解析の結果を図-4 に示す。この図に示されるように、応力低下の過程は複雑な変化を示している。この部分を遷移領域と称することとする。

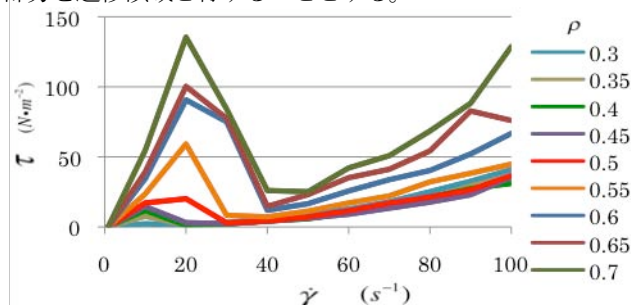


図-2 せん断ひずみ速度とせん断応力の関係

キーワード 動的粒状要素法、粒状体、周期境界、二体衝突理論、レイノルズ応力、クラスタリング

連絡先 〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1 TEL:027-265-7321 E-mail: kishino@maebashi-it.ac.jp

4. 考察

粒状体の流れに関しては、Bagnold²⁾が理論的研究を行い、粒子の二体衝突理論により、せん断応力 (τ) はせん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) の2乗に比例すると結論づけている。シミュレーションで得られた各せん断ひずみ速度に対するせん断応力をプロットし、せん断応力の低下が生じる前の部分について Bagnold による理論式 $\tau = a\dot{\gamma}^2$ でフィティングを行った。理論式に用いた係数 a と密度の関係図を図-5 に示す。このように、応力低下が生じる前においては、密度に応じた係数を用いることにより Bagnold の理論式 $\tau = a\dot{\gamma}^2$ による予測が可能であると言える。図-6 にせん断応力が低下する前の部分について、各せん断ひずみ速度に対する密度とせん断応力—レイノルズ応力比の関係を示した。両者はせん断ひずみ速度に関わらず、ほぼ同様の曲線を描いていることが注目される。

本文で解析した種々のケースの中で、二体衝突理論に従う部分と従わない部分は、図-4 に示した粒子密度に依存する限界線で分離される。このような挙動の違いが生じたメカニズムには、内部粒子が部分的に密に詰まるクラスタリングの形成が関与すると考えられる。実際、粒子運動を動画で見ると、遷移領域以降においては、図-3 の(2)に示されるように、クラスタリング領域と、境界付近の粒子密度の低い領域が観察され、大きな粒子の運動は主として後者の領域に限定されている。このような粒子運動の不均一性が生じることがせん断ひずみ速度とせん断応力の間の関係に複雑な変化をもたらす原因となっている。

なお、図-2 に示されているように、遷移領域を越えた部分では、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係は二次曲線を描いている。この部分では再び Bagnold の理論式によるあてはめも可能である。しかし、この領域は上述のようにクラスタリングが生じており、得られたせん断ひずみ速度とせん断応力の関係はクラスタリング領域を除いた境界層内の特性であり、領域全体の構成則とみなすことはできない。

5. おわりに

以上、密度により粒状体の動的せん断特性が種々変化することがわかった。とくに、Bagnold の理論式はせん断ひずみ速度が密度に依存するある限界値以下でのみ適用可能であるといえる。また、この領域ではレイノルズ応力がせん断応力に比例して生じ、その比例定数はせん断ひずみ速度に依存しないことがわかった。遷移領域以降の力学特性の評価についてはさらに検討をすすめる必要がある。

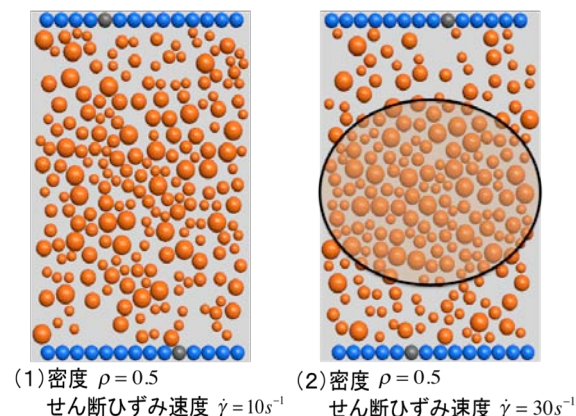


図-3 せん断ひずみ速度による挙動の相違

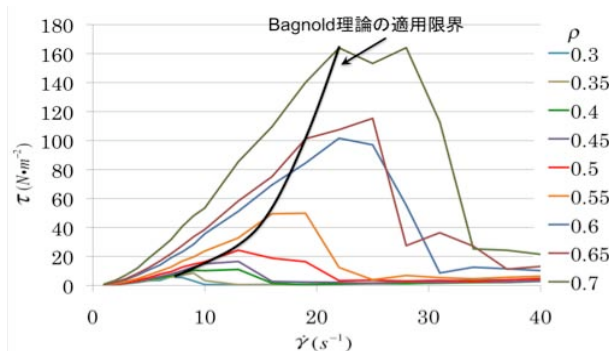


図-4 せん断ひずみ速度とせん断応力

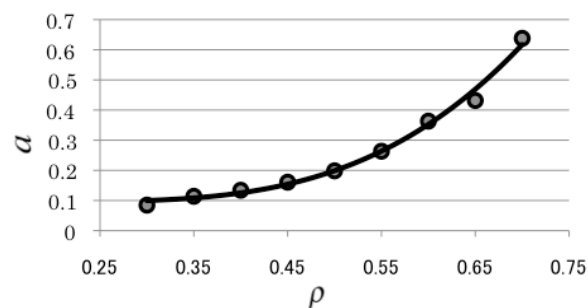


図-5 Bagnold 理論適用範囲における密度と係数 a の関係

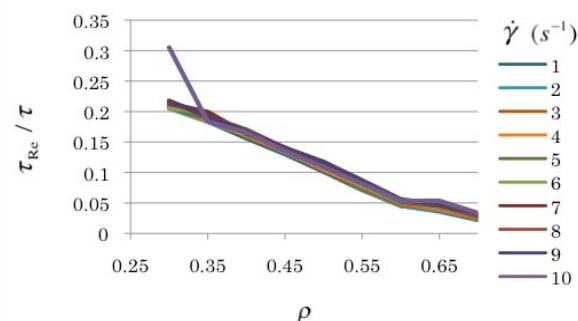


図-6 密度とせん断応力-レイノルズ応力の比の関係

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.