

粒子破碎に伴う粒度変化が粒状体の圧縮特性に及ぼす影響

筑波大学 学生会員 ○上田 高生
 筑波大学 正会員 松島 亘志
 筑波大学 正会員 山田 恭央

1. はじめに

高い圧縮圧力下の粒状体は粒子破碎とそれに伴う再配列を繰り返すことで圧縮することが知られており^{1,2}, 粒状体の圧縮特性を理解するうえで粒度の変移とそれに伴う内部構造の変化は重要な要素である. 個別要素法(DEM)³は個々の粒子の動きをダイレクトにシミュレートできるため, 内部構造の変化を観察するのに適しており, 最近では粒子破碎のシミュレーションも試みられている^{4,5}. 本研究では粒子破碎に伴う粒度変化が粒状体の圧縮特性に及ぼす影響を検討するため, 4種類の初期粒度を持つ粒状体の1次元圧縮をDEMでシミュレートした.

2. シミュレーションの方法

式1に示す対数正規分布に基づき, 平均粒径(D_{50})を10mm, 標準偏差(s)を0.000, 0.0737, 0.230, 0.507mmの4通りとした4種類の粒径分布を作成した(図1).

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2} D} \exp\left(-\frac{(\log_{10} D - \log_{10} D_{50})^2}{2s^2}\right), \quad (1)$$

ここに, D 及び $f(D)$ は粒径及び確率密度分布である. これらの粒径分布に従って粒径3~25mmの円粒子を発生させ, それぞれの円粒子を粒径1mmの円要素の集合体に置き換えることで, 4種類の粒度をもつ団粒の集合体を作成した. 更に, それぞれの団粒が破碎可能なケースと破碎不可能なケースの計8ケースについて1次元圧縮シ

表1 シミュレーションのケース

ケース	粒径の標準偏差, s (mm)	粒子数	要素数	破碎の可否
B000	0.000	55	4180	
B007	0.0737	56	4113	破碎
B023	0.230	74	4973	可能
B051	0.507	107	4645	
R000	0.000	55	4180	
R007	0.0737	56	4113	破碎
R023	0.230	74	4973	不可能
R051	0.507	107	4645	

ミュレーションを行った(表1). シミュレーションにはMatsushimaら⁶によって開発された2次元DEMプログラム「DEMseg」にJiangら⁷により提案されたモーメントバネを導入したプログラムを使用した.

3. シミュレーションの結果

図2(a)-(c)は様々な圧縮圧力(p)でのB023を示しており, 圧力レベルが上がるにつれて多くの粒子が破碎する様子が分かる. なお, 圧縮圧力(p)は予備試験として行った単粒子破碎シミュレーションから求めた単粒子基準破碎強度($\sigma_0 = 1.35$ kN/m)で除して正規化している⁵.

粒度を定量的に評価するため, Wood & Maedaによって提案された粒度指標 I_G を採用した⁸. I_G はフラクタル分布に基づく粒度(2.5フラクタル次元⁹)と対象とする粒状体の粒度を比較する指標で, 粒度のバラつきが大きくなるほど I_G も大きくなる性質を持つ.

図3はB000の様々な圧力レベルでの粒径分布を比較している. p/σ_0 が0.3を超えるレベルから粒子破碎によって生じた小さい粒子の割合が大きくなった. 図4は全ての

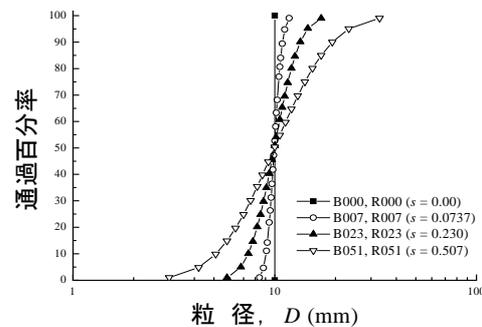


図1 初期状態の粒径分布

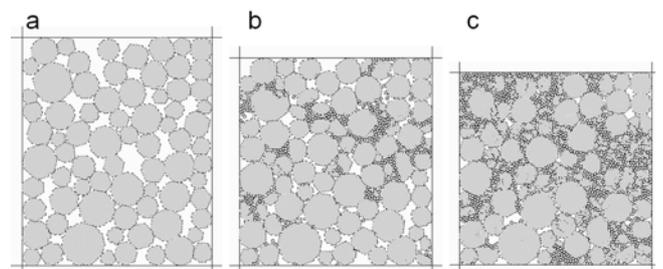


図2 様々な圧力レベルでのB023のイメージ: a) $p/\sigma_0 = 0.00234$, b) 0.416, c) 2.34

キーワード 粒子破碎, 粒度, 圧縮性, 個別要素法(DEM)

連絡先 〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1 TEL 029-853-5138

ケースの圧縮曲線を同時に示している。破碎不可能なケースの間隙比はあまり変化しないのに対して、破碎可能なケースでは、 p/σ_0 が0.3から0.7の時に粒子破碎が起こり、間隙比が急激に減少した。高圧力下($p/\sigma_0=2.3$)では、4つのケースの間隙比が同じ値に収束していった。図5では間隙比(e)と I_G を比較している。圧縮圧力が低い状態では、 e 及び I_G ともに初期粒度の影響¹⁰で4つのケースでバラついてはいるが、高圧力下($p/\sigma_0=2.3$)では e がほぼ同じ値になると同時に、 I_G の幅が低圧力の状態よりも狭まった。これらの結果は、初期粒度に関係なく高い圧縮圧力下では粒度がある限界状態に収束していき、間隙比も一定値になることを示唆している。

図6では e 、 I_G 及び p/σ_0 の変化をWood & Maedaが提案した3次元グラフ⁸で表している。このグラフは粒状体の圧縮曲線を従来の $e-\log p$ 関係として捉えるのでは不十分で、粒度変化の情報(今回は I_G)を含めて3次元的に考える必要があることを示している。

4. まとめ

様々な初期粒度の4種類の粒状体の1次元圧縮シミュレーションを行ったところ、以下の知見を得た。

- 1) 正規圧縮圧力(p/σ_0)が0.3から0.7で粒子破碎が顕著になり、間隙比が急激に減少し(図4)、粒度のバラつきは小さくなった(図5)。
- 2) 高圧縮圧力下では($p/\sigma_0 > 2$)、4ケースの間隙比が同じような値になり、粒度指標の差も初期状態より小さくなった(図5)。このことから初期粒度に関係なく、高圧力下ではある限界粒度に近づいていくことが示唆された。

参考文献

- 1) Weibull, W., J. Appl. Mech. (1951), 15, 293-297.
- 2) Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, F.L., Kato, Y. and Murata, H., Soils Found. (2001), 41(1), 69-82.
- 3) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., Geotechnique (1979), 29(1), 47-65.
- 4) Robertson, D., Ph.D. dissertation, 2000, Cambridge Univ.
- 5) Nakata, Y., Hyodo, M. and Murata, H., Proc. Int. Sym. Geomech. Geotech. Part. (2006), 261-266.
- 6) Matsushima, T., Ikema, T. and Yamada, Y., J. Appl. Mech. JSCE (2009), 12, 489-496.
- 7) Jiang, M.J., Yu, H.-S. and Harris, D., Computers Geotech. (2005), 32, 340-357.
- 8) Wood, D.M., Maeda, K., Acta Geotechnica (2008), 3, 3-14.
- 9) McDowell, G.R., Bolton, M.D. and Robertson, D., J. Mech. Phys. Solids (1996), 44(12), 2079-2102.
- 10) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y., submitted to Powder Tech.

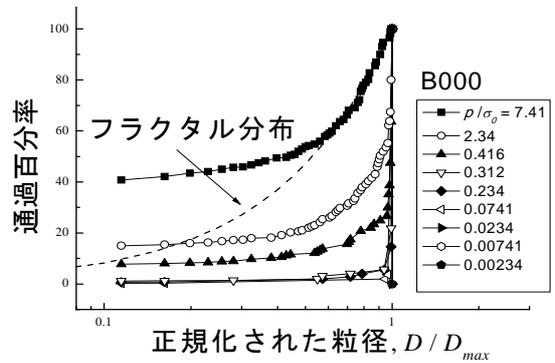


図3 粒径分布の推移

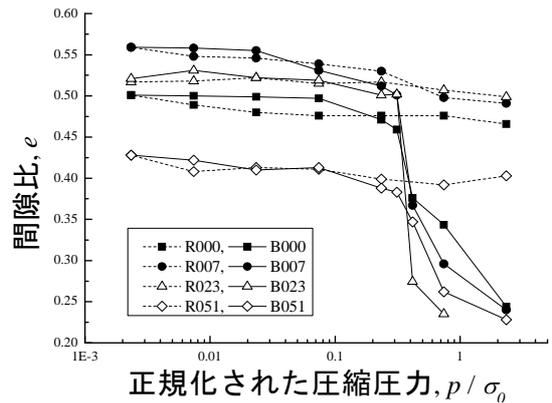


図4 圧縮曲線

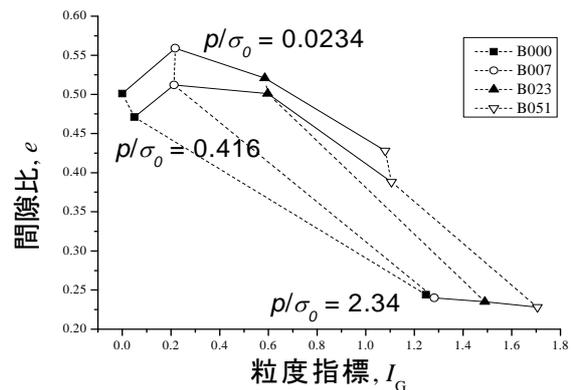


図5 間隙比(e)と粒度指標(I_G)の推移

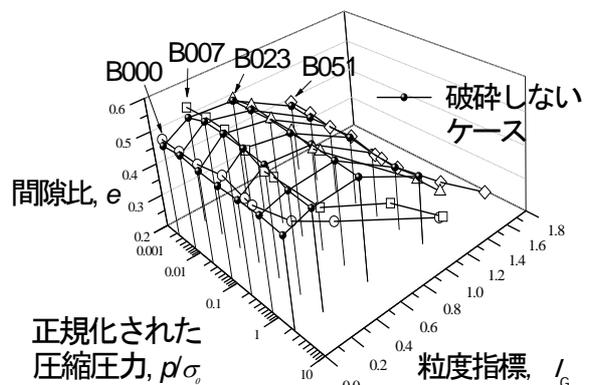


図6 間隙比(e)、正規圧縮圧力(p/σ_0)及び粒度指標(I_G)の相互作用