

粒状体のせん断抵抗速度依存性に関する数値解析的検討  
 The Mechanism of the Shear-Rate Dependence of Granular Friction

○竹本 幸士郎・澤田 純男・後藤 浩之

○Koshiro TAKEMOTO, Sumio SAWADA, Hiroyuki GOTO

We investigated the mechanism of shear-rate dependence of granular friction using Discrete Element Method. In analytical simulations, we confirmed that the peak value of granular friction and the delay of volume expansion appeared when dense granular material is sheared at high speed. We also confirmed that the granular friction is bigger and the volume expansion is later when mass of particles is bigger. From these analytical results, shear-rate dependence of granular friction can be explained caused by the inertia of the particles.

1. 背景

埋設管の耐震設計では、地震時に埋設管に作用する外力を定量的に把握することが重要である。各種耐震設計指針ではこの外力を静的载荷実験に基づいて設定しており、埋設管・地盤間の動的相互作用については適切に考慮されていない。そこで島村ら<sup>1)</sup>によって砂地盤に埋設された管を引き抜く実大実験が行われている。島村らによる実験結果を一部修正したものを図1に示す。図1を見ると、高速引き抜きにおいてせん断抵抗にピーク値が発現していることが分かる。

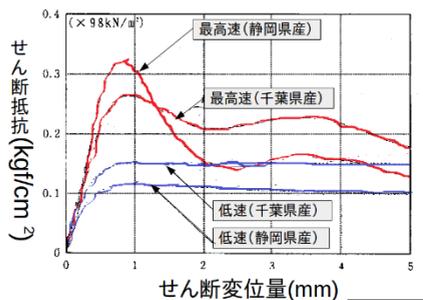


図1 島村らによる埋設管引き抜き実験結果

2. 数値解析(密な粒状体)

このせん断抵抗の速度依存性メカニズムを明らかにするため、個別要素法を用いた数値解析を行った。FC法を用いて1000個の円粒子を圧密した後、重力を抜き、下壁面を一定速度で変位させた(せん断)。速度は300, 100, 50mm/secとし、それぞれ高速、中速、低速と定義する。なおせん断時の粘性係数は0としたため、せん断時の接触力は速

度に依存しないモデルである。上壁面は定応力境界であり、左右境界は周期境界である。そしてせん断時に下壁面にかかる反力と上壁面の変位を測定した。垂直方向の反力と拘束力との比を垂直反力比、せん断方向の反力と拘束力との比をせん断抵抗、上壁面の変位の変化率を体積ひずみと定義する。図2に用いたせん断前の粒状体を示し、表1に用いたパラメタを示す。

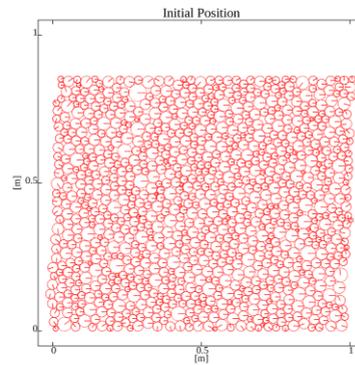


図2 せん断前のスナップショット

粒子数	粒径	時間増分
1000	10~55 [mm]	$1.0 \times 10^{-6}$ [s]
間隙比	法線弾性係数	接線弾性係数
0.135	$4.6 \times 10^6$ [N/m]	$1.3 \times 10^6$ [N/m]
拘束力	粒子密度	粒子摩擦係数
100 [N]	10 [kg/m <sup>2</sup> ]	0.364

表1 用いたパラメタ

図3に異なるせん断速度における垂直反力比、せん断抵抗、体積ひずみを示す。横軸は下壁面のせん断変位である。図3を見ると、高速せん断におい

て、初期に垂直反力比とせん断抵抗にピーク値が発現したこと、体積膨張が遅れたことが分かる。また図4、図5の変位ベクトルを示す。図4、図5を見ると、高速せん断に対して粒子の再配置が遅れ、体積膨張が遅れていることがわかる。体積膨張が遅れることで、上下方向の粒子の噛み合わせが強くなり、垂直反力比が大きくなったと考えられる。以上がせん断抵抗の速度依存性メカニズムであると考えられる。

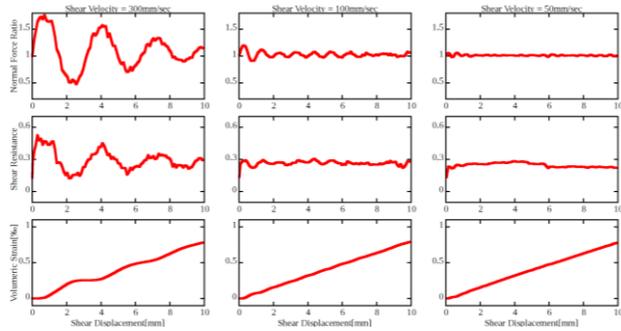


図3 垂直反力比,せん断抵抗,体積ひずみ

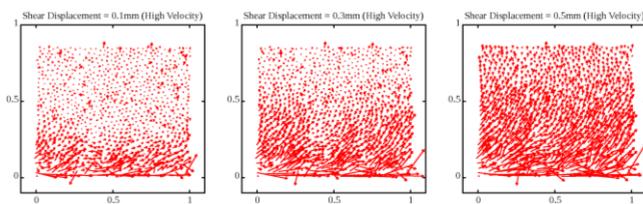


図4 高速せん断における変位ベクトルの変化

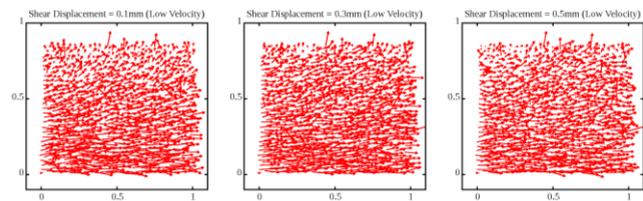


図5 低速せん断における変位ベクトルの変化

### 3. 数値解析 (粒子密度)

次に粒子密度を変更した数値解析を示す。先ほどのせん断前の粒状体から粒子密度を10倍と0.1倍にした粒状体を準備した。他のパラメタは先ほどと同様である。図6に高速せん断における垂直反力比,せん断抵抗,体積ひずみを示す。図7,図8に粒子密度10倍と粒子密度0.1倍の各粒子の変位ベクトルを示す。図6を見ると,粒子密度が大きくなると,体積膨張の遅れと大きな垂直反力比と大きなせん断抵抗が確認できる。図7を見ると,粒子密度が大きいと粒子の再配置に時間がかかり,

体積膨張が遅れている様子が確認できる。より体積膨張が遅れることでより大きな垂直反力比が発現したと考えられる。この結果は前述したメカニズムを支持すると考えられる。

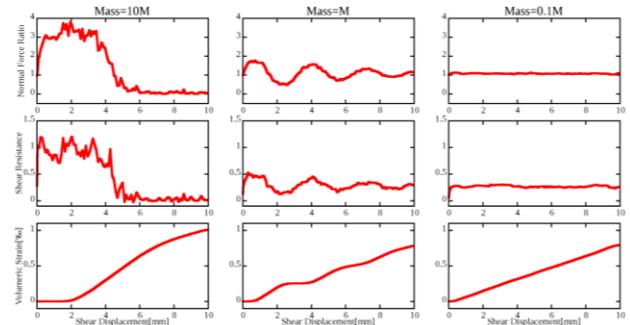


図6 垂直反力比,せん断抵抗,体積ひずみ

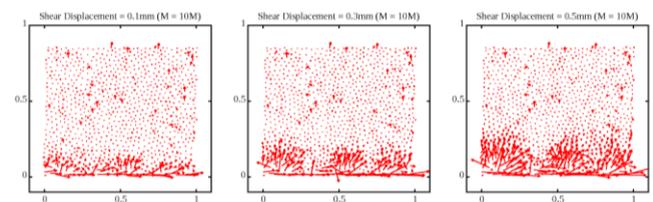


図7 高速せん断における変位ベクトルの変化(粒子密度10倍)

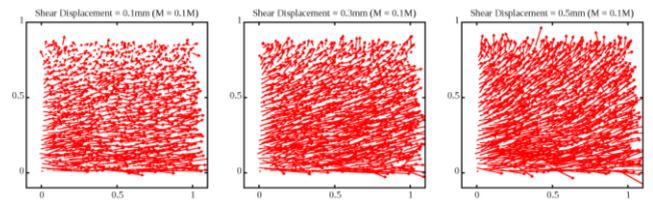


図8 高速せん断における変位ベクトルの変化(粒子密度0.1倍)

### 4. 結論

せん断抵抗の速度依存性メカニズムを明らかにするため,個別要素法を用いた数値解析を行った。高速せん断において体積膨張が遅れ,大きな垂直反力比,大きなせん断抵抗が発現した。また粒子密度を大きくすると大きな速度依存性が発現した。以上より粒状体のせん断抵抗の速度依存性は粒子の慣性に起因すると考えられる。

### 参考文献

- (1) 島村一訓, 竹ノ内博之, 三木千壽, 福澤小太郎. 実大実験による埋設パイプラインの軸方向動的地盤ばね特性の研究. 土木学会論文集, Vol. 46, No. 612, 1999