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

中電技術コンサルタント株式会社　正会員　○竹本　幸士郎
京都大学　正会員　澤田純男
京都大学　正会員　後藤浩之

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載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[(1)]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。

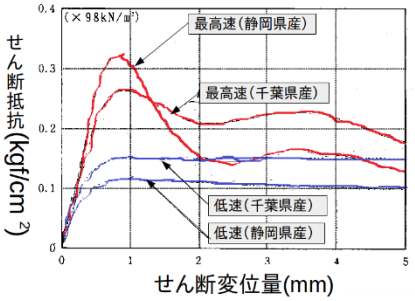

図 1　島村らによる埋設管引き抜き実験結果

2. 数値解析

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。

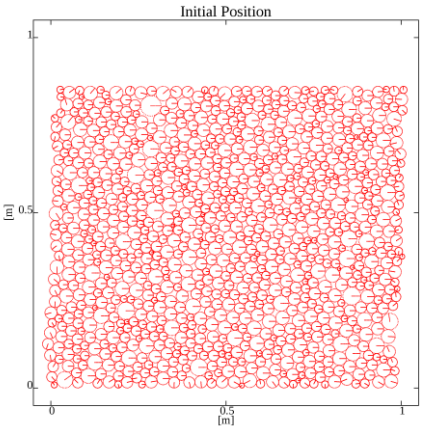

図 2　せん断前のスナップショット

表 1　用いたパラメタ

粒子数	粒径	時間増分
1000	10～55 [mm]	1.0×10^{-6} [s]
間隙比	法線弾性係数	接線弾性係数
0,204	4.6×10^{6} [N/m]	1.3×10^{6} [N/m]
拘束力	粒子密度	粒子摩擦係数
100 [N]	10［kg/m^2］	0.364

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。横軸は時間である。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が分かる。また約 0.002 秒時まで粒状体が定積状体であることと約 0.002 秒時にピーク値が発現したことが分かる。また図 4、図 5 に同じ時間の速度ベクトルをせん断速度別に示す。図 4、図 5 を見ると、せん断速度に関わらず、上方向の変位が下層から徐々に伝わり、約 0.002 秒時に最上層へと到達することが分かる。以上より粒子の慣性によって変形の伝播に時間がかかり、約 0.002 秒定積状体となったと考えられる。0.002 秒間におけるせん断変位は高速では 0.6mm であり、低速では 0.1mm である。以上よりせん断速度が大きいと定積状態のせん断変位は大きいと考えられる。図 6、図 7 に接触力の上下成分を示す。接触力

© Japan Society of Civil Engineers

の上下成分を見ると、高速において上方向の変位が伝播した粒子より下層の粒子において顕著な応力鎖が確認できる。これは高速では定積状態におけるせん断変位が大きいため、大きな圧縮力が働いたと考えられる。また応力鎖が下部境界まで連なっていることから圧縮力は下部境界まで伝わり、垂直反力比が大きくなったと考えられる。また垂直反力比とせん断抵抗の形がよく似ていることから垂直反力比に比例して大きなせん断抵抗が発現したと考えられる。以上が提案するせん断抵抗の速度依存メカニズムである。

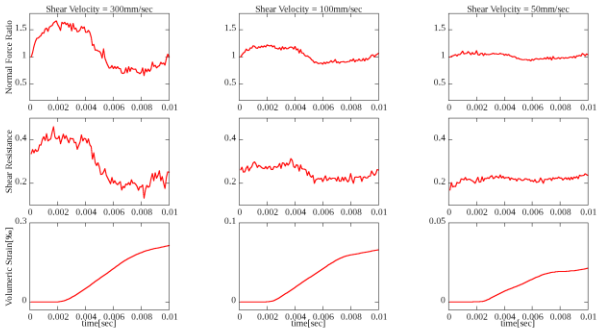

図 3　垂直反力比、せん断抵抗、体積ひずみ

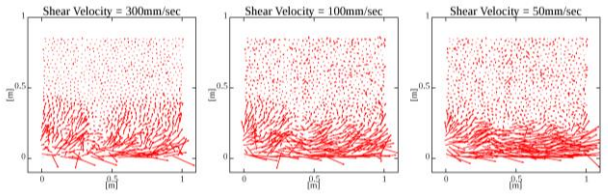

図 4　速度ベクトル（0.001 秒時）

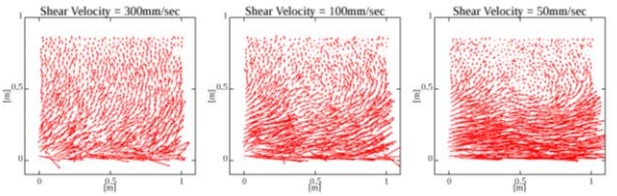

図 5　速度ベクトル（0.002 秒時）

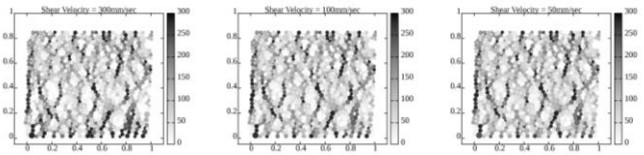

図 6　接触力の上下成分（0.002 秒時）

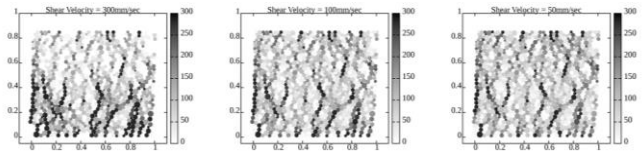

図 7　接触力の上下成分（0.002 秒時）

3. 数値解析（粒子の質量を変更）

次に粒子の質量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の質量を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 8 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 8 を見ると、粒子の質量が大きくなると、定積状態の時間が長いことと大きな垂直反力比と大きなせん断抵抗が確認できる。これは粒子の質量が大きいと粒子の再配置に時間がかかり定積状態におけるせん断変形が大きくなり、大きな圧縮力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。

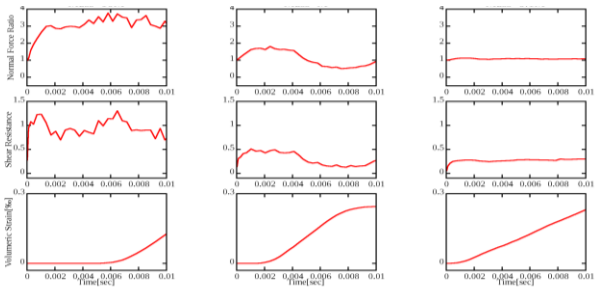

図 6　垂直反力比、せん断抵抗、体積ひずみ

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定積状態におけるせん断変位が大きくなり、大きな圧縮力が発現したと考えられる。また粒子の質量を大きくするとより定積状態の時間が長くなり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

© Japan Society of Civil Engineers