

Ⅲ-242

個別要素法を用いた粒状体の繰り返し載荷時の挙動について

鹿島 技術研究所 正会員 山田岳峰 正会員 林 寛

1. はじめに

最近、トンネル等の地中構造物の安定性を個別要素法で検討するケースがよく見受けられる。個別要素法は特に破壊あるいは大変形といった有限要素法では解析が難しい現象の解析に適した方法と考えられ、現在、このようなひずみの局所化が進行する系についての研究が実施されている。ここで、個別要素法が粒状体の挙動を直接取り扱えることに立ち返ると、砂質地盤等についてはひずみレベルに係わらず個別要素法を適用してもいいように思われる。ただし、この場合には個別要素法による地盤の応力～ひずみ関係の再現性に関する検討が必要である。個別要素法を用いた地盤の応力～ひずみ関係の研究は、現在まで多数実施されており、単調載荷に関しては定性的に表現できることが分かっているが、まだ定量的な議論には至っていないのが現状といえる。繰り返し載荷に関してはさらに研究例が少ない。そこで、今回、砂の繰り返し載荷時の挙動を個別要素法で表現することを試み、個別要素法を用いた地盤要素のモデル化について考察した。

2. 検討方法

砂の繰り返し単純せん断試験のシミュレーションを2次元モデルで試みた。解析コードはPFC2D(Itasca Consulting Group, Inc., 1994)を用いた。粒子間モデルを図1に示す。バネは線形モデル及びHertz-Mindlinモデルの2種類について検討した。Hertz-Mindlinモデルは次式¹⁾で示され、接線方向バネのせん断力依存性を考慮しない簡易モデルを用いている。

$$K^n = \left(\frac{2\langle G \rangle \sqrt{2\bar{R}}}{3(1 - \langle \nu \rangle)} \right) \sqrt{U^n} \quad k^s = \left(\frac{2\left(\langle G \rangle^2 3(1 - \langle \nu \rangle) \bar{R} \right)^{1/3}}{2 - \langle \nu \rangle} \right) F_i^n \Big|^{1/3}$$

ここで、 K^n ：法線方向バネの割線剛性

$\bar{R}$ ：接触2粒子の換算半径 $\bar{R} = \frac{2R^A R^B}{R^A + R^B}$

k^s ：接線方向バネの接線剛性

U^n ：接触2粒子のオーバーラップ量

$\langle G \rangle$ ：接触2粒子のせん断剛性の相加平均

F_i^n ：接触2粒子の法線方向接触力

$\langle \nu \rangle$ ：接触2粒子のポアソン比の相加平均

1) 供試体の作製

供試体の作製は、壁要素で囲まれる幅10cm高さ10cmの領域に3粒径(半径0.105, 0.138, 0.18cmでそれぞれ275, 150, 75個; 豊浦標準砂の粒度の15倍程度の相似粒度)で構成される球粒子(粒子間モデルは線形バネ, 粒子間摩擦係数は0)を一様に発生させ、初速度1m/sで自由落下させ十分に安定した後、所定の高さの粒子を取り除き、微少な上載圧を上面壁要素を介して作用させた。以上、壁と粒子の摩擦は考慮していない。その後、表1に示す所定の定数を設定し、98kPaの上載圧を載荷して十分に安定させた。ここで、線形モデルのバネ定数は、Hertz-Mindlinモデルにおいてセッティング終了後に発現されているバネ定数を用いている。セッティング終了後の供試体の状況を図2に示す。最終的な供試体寸法は幅10cm高さ3.17cmで総粒子数は496個(横断面間隙比0.193)である。

2) セン断

上載圧一定で、図3に示す繰り返しせん断ひずみを側壁を0.05rad/sの速度で回転させることにより載荷した。せん断時の供試体の状況を図4に示す(図2と比較すると、同図から、せん断に伴い、粒子間力の集中方向がせん断方向に向かって回転することが分かる)。

3. 結果と考察

図5に、繰り返しせん断応力～せん断ひずみ(γ)関係を一方向せん断したときの応力～ひずみ関係とともに示す。また、図5から評価されるせん断剛性、減衰定数とせん断ひずみの関係を図6に示す。ここで、図6には、参考として、豊浦標準砂の実験結果も併せて示す。豊浦標準砂の単純せん断強度は上載圧が98kPaでは一般的に60～80kPa程度になると考えられるが、今回の解析では、図5から分かるようにせん断強度が35kPa程度で実際の砂の強度を過小評価し、また、破壊ひずみも小さい結果となっている。しかしながら、 $\gamma=0.1\%$ 以下では、線形モデル及びHertz-Mindlinモデルとも、ひずみレベルが大きくなると、せん断剛性が小さくなり減衰定数が大きくなる実際の砂の挙動を小さなひずみレベルから定性的及び定量的にも表現できていることが図6から分かる。これより、このひずみレベルでは骨格曲線、履歴曲線の形状とも概ね実際の砂の挙動を表現できているようである。ここで、両モデルにおいて、微小ひずみレベルの挙動の表現が可能なのは、せん断の比較的初期の段階から粒子間のすべりが発生しているためと考

えられ、これは、破壊ひずみが小さいことと関連していると思われる。また、線形モデルとHertz-Mindlinモデルを用いた解析結果に大きな差が見受けられないのは、上載圧一定の単純せん断試験ではすべりが卓越する粒子間の法線方向力の変化が小さく、Hertz-Mindlinモデルでバネ定数の変化が小さくなることから、結果として両者の骨格曲線の差が小さくなるためと考えられる。

4. おわりに

個別要素法を用いて、粒状体の繰り返し単純せん断試験のシミュレーションを実施した。その結果、一定の条件下では実際の砂のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性を概ね個別要素法で表現できることが分かった。広範なひずみレベルで繰り返し載荷も含めた砂の挙動を個別要素法で表現するためには、Dobryら³⁾の指摘にあるように、粒子間モデルに繰り返しせん断に伴う履歴減衰を評価することができる例えばリジナルなHertz-Mindlinモデル等の導入が必要な可能性も考えられる。砂の力学挙動を単純化された個別要素法でバランス良く表現するため、今後、粒子と粒子間モデルのモデル化について詳細に検討していきたい。

<参考文献>

- 1) Itasca Consulting Group, Inc., 1994, "PFC3D Version 1.0 Volume II: Appendices"
- 2) 清田, 田村: 繰り返しせん断力を受ける砂の動的変形特性に関する研究, 鹿島技術研究所年報, 第39号, 1991.
- 3) Dobry, R. and Ng, T.T., 1989, "Discrete Modeling of Stress-Strain Behavior of Granular Media at Small and Large Strains", 1st U.S. Conf. on Discrete Element Methods.

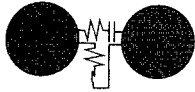


図1 用いた粒子間モデル

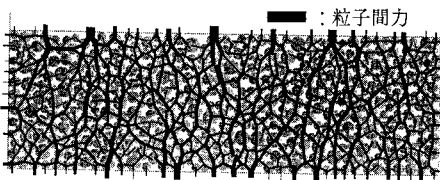


図2 セッティング終了後の供試体の状況
(線形モデル)

表1 解析に用いたパラメータ

粒子間モデル	線形	Hertz-Mindlin
粒子質量 (kg/m ³)	2650	
重力加速度 (m/s ²)	9.81	
法線方向バネ定数 (N/m)	1.11E+06	—
接線方向バネ定数 (N/m)	1.53E+06	—
せん断剛性 (N/m ²)	—	2.00E+10
ポアソン比	—	0.15
粒子間摩擦係数	0.8	

ここで、quartzのせん断剛性は3~4E10 (N/m²)程度と考えられる。

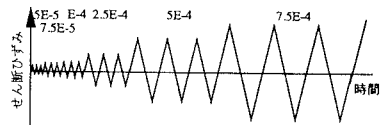


図3 載荷した繰り返しせん断ひずみ

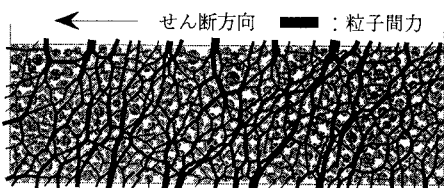
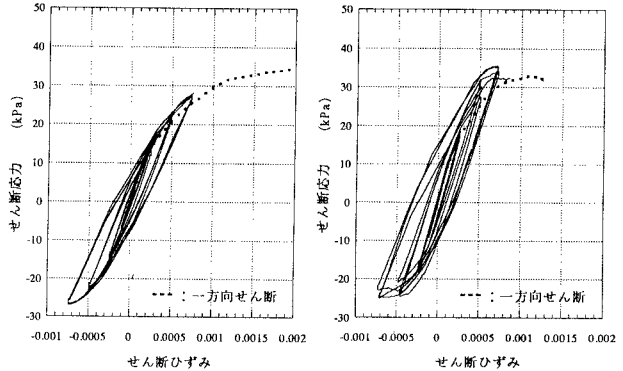


図4 せん断時の供試体の状況
(線形モデル; $\gamma = 5.032 \times 10^{-4}$)



(a)線形モデル

(b)Hertz-Mindlinモデル

図5 繰り返しせん断応力～せん断ひずみ関係
(解析結果)

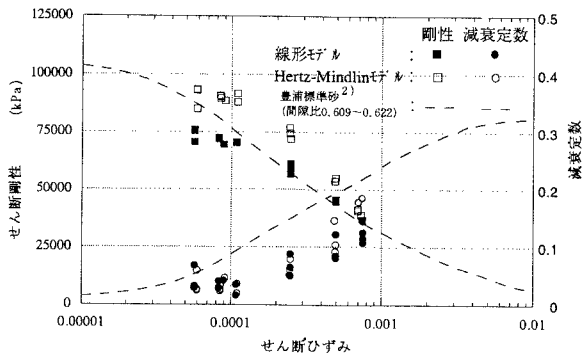


図6 せん断剛性及び減衰定数とせん断ひずみの関係
(解析結果)