

# Ⅲ－34 動的粒状要素法を用いたシミュレーション試験によるせん断載荷特性の考察

東北大学 学生会員 ○塩田 洋平  
正会員 京谷 孝史  
フェロー 岸野 佑次

## 1. はじめに

Di Benedetto et al.<sup>1)</sup>によれば、地盤材料の粘性の原因として、主に間隙水によるものと粒子自身の粘性によるものが挙げられる。ここでは間隙水の影響を受けないモデルを想定し、粒子の持つ粘性にのみ着目する。

本研究は、擬似的な動的3次元粒状要素法を用いてせん断載荷シミュレーション試験を行い、その結果に基づいて粒状体のせん断載荷特性及び粘性に関して考察を行ったものである。

## 2. せん断載荷シミュレーション試験について

本研究で用いたシミュレーション試験は、粒子の接触関係から得られる剛性行列に基づいて粒子を移動させる準静的な解析法に、さらに慣性力を考慮することで擬似的に動的な解析を行う試験である。系全体の構成式を次式に示す。

$$Ku = F_c + F_i \quad (1)$$

ここに、 $K$ は全体の剛性マトリクス、 $u$ は粒子の変位ベクトル、 $F_c$ は接触力、 $F_i$ は慣性力である。式(1)を解き、全粒子の接触力を判定する。接触力が負である場合には強制的に0と置く。同時に、摩擦係数 $\tan \phi_\mu$ の大きさを次式を満たすように制限する。

$$|P_t| \leq |P_n| \tan \phi_\mu \quad (2)$$

摩擦係数 $\tan \phi_\mu$ に関しては、粒子間の相対速度で次式のよう
に割増をする。

$$\tan \phi_\mu = (1 + C_r d_1) \tan \phi'_\mu \quad (3)$$

ここに、 $C_r$ は比例定数であり、 $C_r = 10$ としている。 $d_1$ は粒子間相対速度の接線方向成分であり、 $\tan \phi'_\mu$ は静的な摩擦係数である。得られた不釣り合い量を再び式(1)に代入し、変位 $u$ がある値に収束するまで繰り返し計算を行う。

本研究では供試体モデルを圧縮したものを初期状態とし、その後1方向にせん断載荷を行う。このせん断載荷シミュレーション試験は、応力制御により実施する。また、粘性の影響を調べるために、一定の応力増分で載荷した後、一時的に応力増分を限りなく0に近づける操作を行う。使用する供試体モデルについて、詳細を図-1及び表-1に示す。

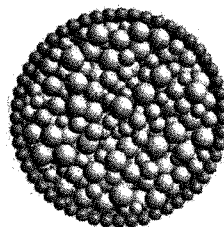


図-1 粒状体モデル

## 3. 応力-ひずみ関係の速度依存性に関する結果及び考察

図-2に、ひずみが0.05%以下での応力比とせん断ひずみの関係を示す。澁谷<sup>2)</sup>らによれば、このようなせん断初期での剛性に及ぼすひずみ速度の影響は小さいとあるが、図-2はこれによく符合する。また、同じひずみ範囲での供試体の剛性を表-2にまとめる。表-2より、供試体の剛性はおよそ $3\text{N/mm}^2$ であるが、これは澁谷らの研究で用いられている実際の地盤材料と比較するとオーダー的にも非常に小さいという結果となった。この点については、ばね定数の設定をより大きくすることで試験体の剛性を大きくすることが可能であると考えられる。

一方、ひずみが0.05%よりも大きい場合も含めた応力-ひずみ曲線を図-3に示す。これより、ひずみレベルが大きい場合には、載荷速度による差異が現れていることが分かる。図-3では、載荷速度が大きいほど早い段階でピーク応力に近づく傾向が見られる。

## 4. クリープ現象に関する結果及び考察

図-4、5に、せん断試験中に載荷速度を急変させた際の応力-ひずみ曲線を示す。速度の急変は、ここではひずみが0.8%に達した時点で行った。載荷速度を急激に限りなく0に近づけることで、応力比はほぼ一定でせん断ひずみのみ進展していくクリープ現象が見られた。さらに再び載荷速

表-1 供試体データ

| 粒子数  | 粒子直径<br>(mm) | $k_n$<br>(kN/m) | $k_t$<br>(kN/m) | 内部<br>摩擦角度(°) |
|------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1577 | 0.16~0.3     | 40              | 28              | 15            |

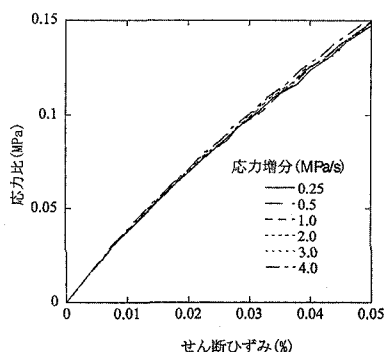


図-2 低ひずみレベルでの剛性

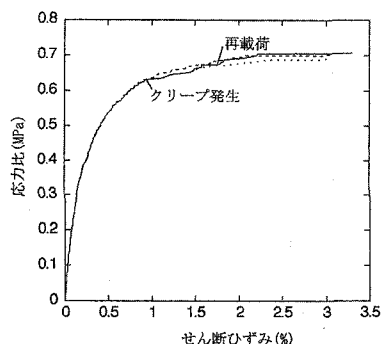


図-4 クリープ現象の発生 (応力増分 1.0MPa/s)

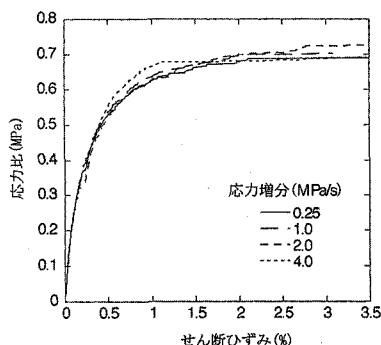


図-3 応力-ひずみ関係の速度依存性

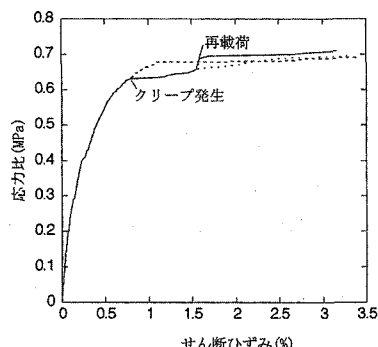


図-5 クリープ現象の発生 (応力増分 4.0MPa/s)

度を急変前の速度に戻すことで、応力-ひずみ曲線も急変前の曲線に戻ろうとする挙動が見られた。図-4, 5の比較から、クリープの進展の状況は直前の載荷速度に依存せずほぼ一定であると言える。

解析モデルでは間隙水の影響を考慮していないため、このような現象は間隙水の時間遅れ移動によるものではなく、粒子自身の粘性による時間遅れ現象によるものであると言える。

## 5. おわりに

本研究では粒状体のせん断載荷特性について、応力-ひずみ関係の速度依存性及び乾燥砂の粘性について考察を行った。応力-ひずみ関係の速度依存性に関して、低ひずみレベルにおける供試体の剛性には3%程度の違いしか見られな

い。一方、ひずみが0.2%を超えた領域では載荷速度による違いが現れる。載荷速度の大きいものほど早い段階でピーク応力に達する傾向にある。また、本研究では間隙水を考慮しない粒状体モデルでのクリープ現象の発現を確認した。クリープの発生時期を変化させていくことで、乾燥砂のクリープ現象に関するさらなる考察が可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) Di Benedetto, H., Tatsuoka, F. and Ishihara, M. : Time-dependent shear deformation characteristics of sand and their constitutive modelling, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 2, pp. 1-22, 2002.
- 2) Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim, Y.-S. and Park, C.-S. : Elastic deformation properties of geomaterials, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 3, pp. 26-46, 1992.

表-2 供試体データ

| 応力時間増分<br>(N/mm <sup>2</sup> ・s) | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| ヤング率<br>(N/mm <sup>2</sup> )     | 3.11 | 3.14 | 3.14 | 3.16 | 3.15 | 3.23 |