

Ⅲ－27

三次元粒状要素法による多方向非排水せん断特性の解明

東北大学 学生員 ○森 豊明
 東北大学 フェロー 岸野 佑次
 東北大学 学生員 石井 建樹

1. はじめに

地震時に地盤に作用するせん断は多方向に不規則に変動する。通常の液状化実験を行うための繰り返し三軸試験装置では、繰り返しせん断の方向が固定されているために、実現象での複雑な挙動を調べることが不可能である。より一般的に地震時の液状化を再現するためには多方向繰り返しせん断を与える必要がある。そこで、本研究では三次元粒状要素法を用い、一方向および多方向の繰り返しせん断を与える試験を行い、液状化における多方向せん断の影響を調べる。さらに、微視的構造の変化と巨視的挙動の関係を着目し、液状化の微視的メカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 供試体モデルの特性

解析モデルは、粒子直径が0.10～0.26cm、粒子数475個の球形粒子集合体で、この内202個は境界制御を行うための境界粒子とし、残りの273個を内部粒子とする。供試体モデルの内部粒子配置図を図-1に示す。内部粒子は所定の球形領域に球形粒子をランダムにパッキングしたものとする。また、接触点における法線および接線方向バネ定数はそれぞれ、 $k_n=200\text{ kN/m}$ 、 $k_t=140\text{ kN/m}$ 、粒子間摩擦角は 15° とした。初期状態は解析モデルを平均応力が100kPaになるまで等方圧縮したものとする。供試体モデルの特徴を調べるために、排水条件、非排水条件で単調載荷試験を行った。それにより得られた軸ひずみ－軸差応力関係を図-2に、平均応力－軸差応力関係を図-3に示す。これによると供試体モデルの特性として次のようなことが挙げられる。

- ・非排水単調載荷によっても平均有効応力の急激な低下が起こる、非常にゆる詰めの供試体モデルである。
- ・載荷に伴う軸ひずみの変化は連続的ではなく、ある時点で粒子配列が崩れ、急激にひずみが生じる。そのとき有効応力は著しく低下する。
- ・軸ひずみが急激に増加する応力レベルは、x方向のほうが y方向よりも小さい。

3. 解析方法

等方圧縮後、繰り返し載荷を行う。非排水条件とするために体積一定条件

$$\Delta\epsilon_{xx} + \Delta\epsilon_{yy} + \Delta\epsilon_{zz} = 0$$

を導入し、偏差応力のみを制御する。同じ大きさの応力増分の載荷・除荷を繰り返す試験を行い、x方向のみ、y方向のみ、x、y方向交互の三つの載荷方法で試験を行う。本研究ではx、y方向交互に載荷するものを多方向せん断と称する。

4. 解析結果および考察

図-4に、軸差応力振幅と急激に有効応力が低下がみられるまでの繰り返しせん断回数との関係を示す。同図より、軸差応力振幅が大きいほどせん断繰り返し回数が少なくても液状化に至ることがわかる。また、振幅が大きい場合、多方向せん断においてx方向への載荷の影響が強く表れているが、これは先に述べた供試体モデルの特性に起因するものと考えられ、材料の強度異方性に支配されているということができよう。振幅が小さい場合、このような強度異方性が液状化に及ぼす影響は少ないと考えられる。

軸差応力振幅18kPaのケースでは異方性によらない多方向せん断の影響によって、液状化が早められたと考えることができる。このケースでは、x方向、y方向、多方向せん断でそれぞれ8回、9回、7回のせん断回数で液状化が起こった。これらのケースにおいて得られた微視的変数について考察する。

図-5,6は繰り返しせん断載荷の各周期終了時点での粒子間接触点数の変化とすべり点数の変化を示したものである。すべり点は接触力の接線方向成分がMohr-Coulombの摩擦則で表される摩擦力と等しくなった接触点である。液状化が進むにつれ、接触点数は徐々に減少するが、すべり点数はあまり減少しない。最終的に、液状化に至ると、接触点数は急激に減少、すべり点数は急激に増加し、両者の差が小さくなる。その結果、

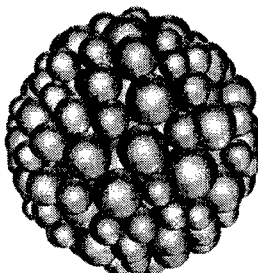


図-1 粒状供試体モデル

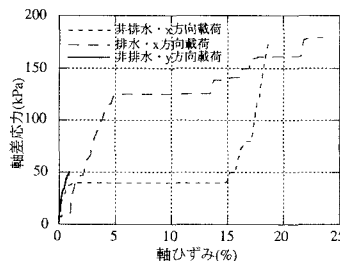


図-2 軸ひずみ-軸差応力関係

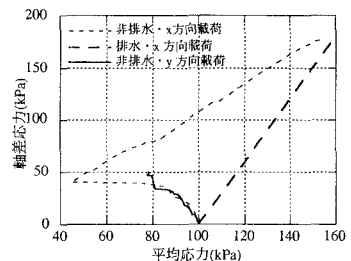


図-3 平均応力-軸差応力関係

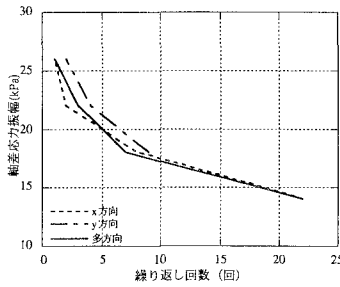


図-4 液状化までの繰返し回数

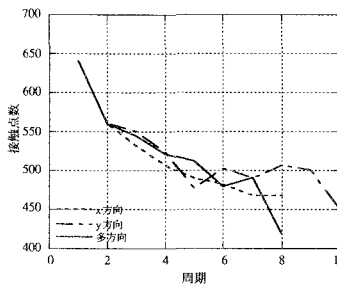


図-5 接触点数の変化

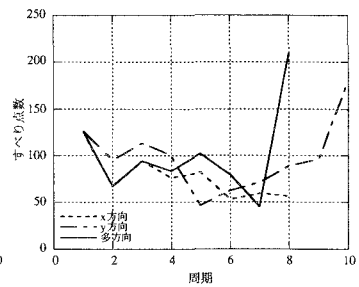
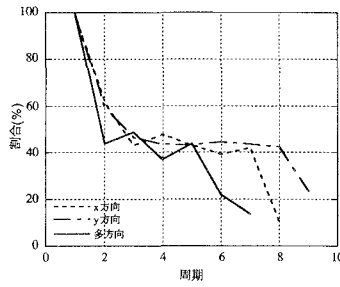
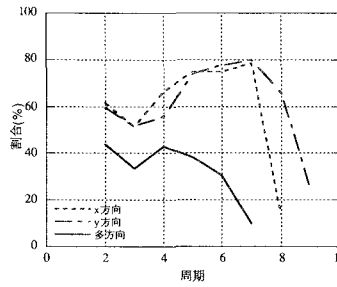


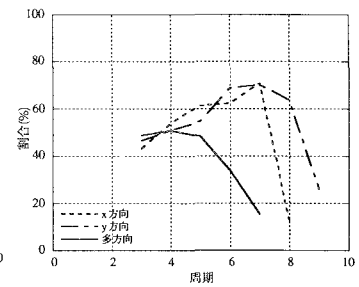
図-6 すべり点数の変化



a) 第一周期と比較



b) n-1周期と比較



c) n-2の周期と比較

図-7 すべり点の相関性の変化

接触点が全体的にすべるモードとなることを示している。

いま、第 n 番目の最大偏差応力点のすべり点の集合を X 、それより前のある最大偏差応力点における集合を Y とする。両者に共通するすべり点の集合を Z とし、 Y にしめる Z の割合により、すべりの相関性の変化を調べる。図-7は Y を、a)第一周期b)n-1周期c)n-2周期としたときの相関性の変化を示したものである(図-8参照)。図-7-a)をみると、周期が進むにつれ、割合が減っている。これは、液状化が進むにつれて最初の周期と違う部分の接触点がすべり得るような内部構造の変化が起こったと考えることができる。特に、载荷の始めと液状化したとき、その割合は著しい。図-7-b)において多方向せん断の同じ粒子の組が接触している割合が一方せん断のものよりも著しく小さい。これは、多方向せん断では载荷方向が一周期ごとに異なるためである。一方、図-7-c)では多方向せん断においても同じ载荷方向のときの接触状態と比較しているが、やはり多方向せん断の場合の割合が一方せん断のものよりも小さい。これらのことから、多方向せん断の場合、内部構造の変化がより広域に起こり、有効応力の低下を促進するといえる。また、一方せん断では液状化の直前まで前の周期と同じ粒子どうして接触している組の割合が増加する傾向にあり、単一のせん断メカニズムに支配されて状態が変化すると考えられるが、多方向せん断ではそのような傾向はないことが注目される。

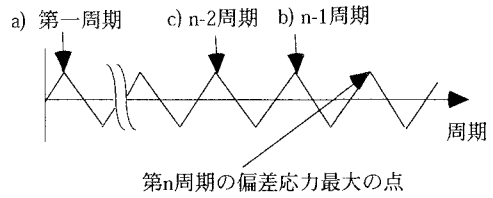


図-8 比較位置

5. まとめ

本研究では、三次元粒要素法を用い、液状化における多方向せん断の影響を微視的なアプローチによって考察した。その結果、多方向せん断より、一方せん断では変化に関与しない粒子の配列構造において変化が生じるため、液状化が促進されるということが分かった。

参考文献

- 1) Kishino, Y., Akaizawa, H. and Kaneko, K.: On the plastic flow of materials, Powder and Grains 2001, pp.199-202, 2001
- 2) Kishino, Y: The incremental nonlinearity observed in numerical tests of granular media, CD-ROM Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2002