

可視化リングせん断試験の動画計測に基づく液状化時の砂粒子運動解析

京都大学 学生会員 ○木村 圭吾

東京大学 正会員 栗間 淳

京都大学 正会員 後藤 浩之

京都大学 正会員 澤田 純男

京都大学 王 功輝

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、震源から遠く離れた東京湾周辺地域においても広く地盤の液状化による大規模な被害が発生した。液状化時の砂粒子の挙動に関する数多くの研究が行われているが、実際に砂粒子がどのように動いているかはわからないことが多い。

本研究では、液状化時の砂粒子の運動を直接観察することを目的とし、可視型リングせん断試験機を用いた非排水繰り返し載荷試験を行い、せん断箱内の砂粒子をカメラで撮影し動画計測を行った。

2. 可視型リングせん断試験機

本試験には可視型リングせん断試験機として、京都大学防災研究所斜面災害研究センターが所有するリングせん断7号機¹⁾を用いた。リングせん断7号機は上部せん断箱が透明なアクリル製のリングせん断型試験機であり、試験中の砂粒子の様子を外部から直接観察することができる。非排水条件下の載荷が可能で、鉛直応力載荷は油圧サーボ、せん断応力載荷はサーボモータを用い、速度制御、応力制御、変位制御が可能である。せん断方向に関しては、繰り返し載荷、一方向のせん断載荷が可能である。なお、側面の変位が固定されているため、側方圧の制御できない。

3. 動画計測

動画計測とは動画上の物体の動きを数値化することである。本研究では、図1のように上部せん断箱の砂粒子の様子を側面から撮影した動画を用いて、砂粒子の運動(並進運動と回転運動)を数値化した。使用した機器は、デジタルビデオカメラ(Nikon製:D610)1台、高速度カメラ(DITECT製:HAS-U1)1台、動画解析ソフト(DITECT製:Dipp-Motion V/2D)である。

4. 試験手順

乾燥炉で乾燥させた試料に水を加え、含水比を測定する。その後、せん断箱上端面より試料を可能な限り均一になるように徐々に流し込む。その後、二酸化炭素と脱気水で供試体を飽和させる。供試体の飽和度の確認を佐々²⁾により提案された B_D 値を計測することにより行う。供試体を排水条件で所定の鉛直応力まで圧密し、その後、非排水条件に変更し鉛直応力を増加させる。その時の過剰間隙水圧の増分 Δu を鉛直応力の増分 $\Delta \sigma$ で除した値が B_D 値である。 B_D 値計測後、排水条件に戻し、所定の鉛直応力まで供試体を正規圧密する。供試体作成後、試験条件に応じて載荷を行う。

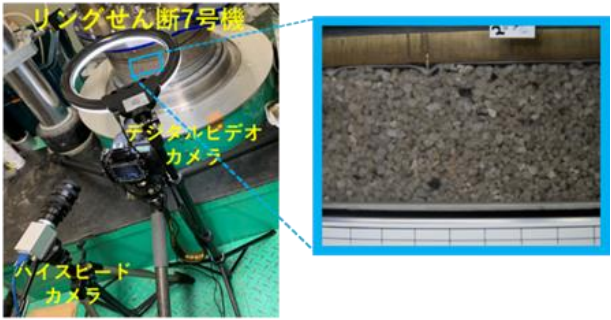


図 1. 可視化リングせん断試験の様子

5. 供試体諸元

一般に液状化試験では豊浦砂が用いられることが多い。しかし、豊浦砂の平均粒径(D_{50})は約0.260mmであり、動画解析ソフトで砂粒子の運動を解析するには粒径が小さすぎて砂粒子の運動を追うことができなかった。そこで、動画解析ソフトで解析が可能となるよう粒径の大きい珪砂2号を用いた。本試験に用いた珪砂2号の諸元、粒径加積曲線を表1、図2にそれぞれ示す。

表 1. 珪砂 2 号の諸元

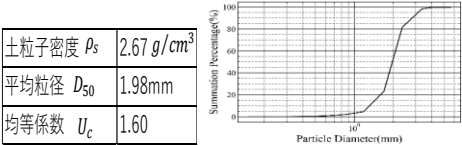


図 2. 珪砂 2 号の粒径加積曲線

キーワード液状化, リングせん断試験, リングせん断 7 号機, 非排水繰り返し載荷, 動画解析, 砂粒子運動
連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学耐震基礎研究分野 TEL 0774-38-4069

珪砂2号を用いて、表2に示す間隙比が異なる3種類の供試体A、B、Cを作成した。

表 2. 供試体諸元

	供試体A	供試体B	供試体C
圧密鉛直応力 (kPa)	150	150	250
圧密後の間隙比	0.916	0.828	0.997

6. 試験条件

本試験では、図3のように非排水繰り返し载荷を行った後、非排水条件および鉛直応力150 kPaの定応力制御条件を保った状態で、速度制御によるせん断速度0.05cm/s一定の非排水単調载荷を行う。その後、鉛直応力を一定に保ったまま排水を行い再圧密することを1ステージとして、3ステージの非排水载荷を行った。非排水繰り返し载荷では鉛直応力、せん断応力をそれぞれ定応力制御条件、せん断応力制御条件で载荷し、全ケースで初期鉛直応力、载荷鉛直応力を150 kPa、繰り返し载荷回数を20回とした。表3に試験ケースおよび試験条件を示す。

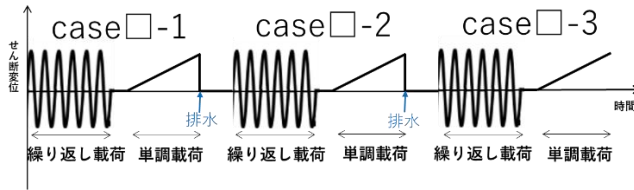


図 3. ステージ概略図

表 3. 試験ケースおよび試験条件

	供試体A			供試体B			供試体C		
	caseA-1	caseA-2	caseA-3	caseB-1	caseB-2	caseB-3	caseC-1	caseC-2	caseC-3
载荷前の間隙比	0.916	0.819	0.778	0.814 (密)	0.779	0.741	0.99 (緩)	0.917	0.899
载荷周波数 (Hz)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.05
せん断応力振幅 (kPa)	35	35	35	67	37	67	57	37	57
载荷パターン	繰+単	繰+単	繰+単	繰+単	繰+単	繰+単	繰のみ	繰+単	繰+単

7. 試験結果

caseB-1, caseC-1の非排水繰り返し载荷試験の結果について述べる。間隙比が小さく密な供試体であったcaseB-1では、図4に示すように過剰間隙水圧が上昇し、有効応力の減少・回復を繰り返すサイクリックモビリティが生じた。図5にせん断面に近い層と遠い層の砂粒子の水平変位・鉛直変位・初期からの回転角の平均を示す。水平変位・回転角の振動の振幅はせん断面に近い層の方が大きいのに対して、鉛直変位の振動の振幅は場所によらずほぼ等しい。また、水平変位と回転角は同じ周期で振動し、それらの周期は過剰間隙水圧と鉛直変位の振動の周期の1/2倍になっている。

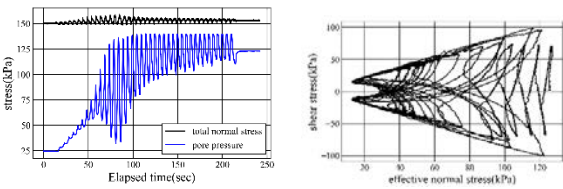


図 4. caseB-1 過剰間隙水圧、鉛直応力の時刻歴(左),有効応力経路図(右)

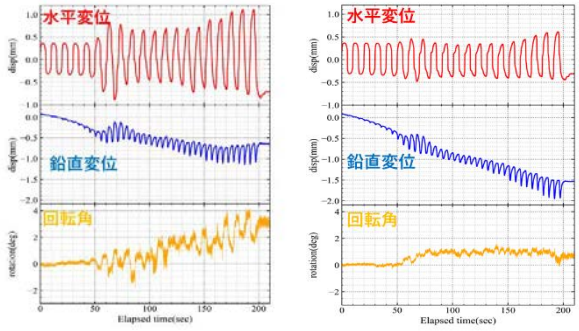


図 5. caseB-1 セン断面に近い層(左),せん断面から遠い層(右)の水平変位(上), 鉛直変位(中), 回転角(下)の時刻歴

一方、間隙比が大きく緩い供試体であったcaseC-1では、図6に示すようにサイクリックモビリティが生じなかった。また、図7より回転角の振動の振幅はせん断面に近い層の方がやや大きいのに対して、水平変位・鉛直変位の振動の振幅は場所によらずほぼ等しい。

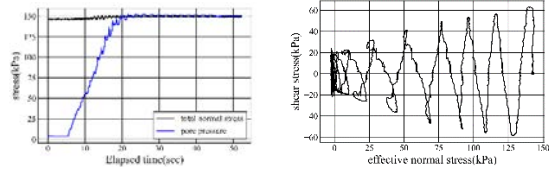


図 6. caseC-1 過剰間隙水圧、鉛直応力の時刻歴(左),有効応力経路図(右)

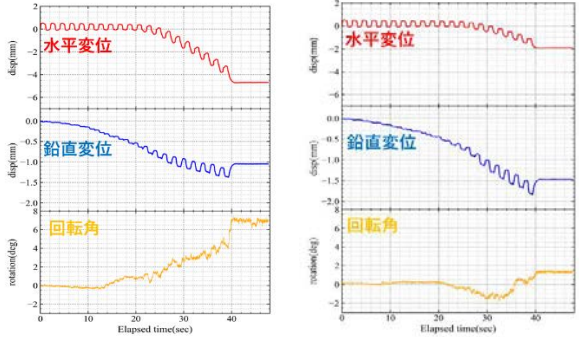


図 7. caseC-1 セン断面に近い層(左),せん断面から遠い層(右)の水平変位(上), 鉛直変位(中), 回転角(下)の時刻歴

8. まとめ

サイクリックモビリティが生じている時の粒子の運動にはある共通した特徴がみられる。水平変位と回転角の振動がせん断面に近いほど大きいことから、せん断面近くの粒子は水平変位だけでなく回転運動も生じている。一方で、鉛直変位の振動は場所によらずほぼ等しい。以上より、せん断面近くの粒子の乗り越え、または回転運動によって全体的に一樣な鉛直振動、すなわち、ダイレイタンシーが生じている可能性がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費(21K18791)の助成を受けました。

参考文献

1) Kyoji Sassa, Hiroshi Fukuoka, Gonghui Wang, and Naohide Ishikawa. Undrained dynamic loading Landslides, ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. Landslides, Vol. 1, No. 1, pp. 7-19, 2004.
2) 佐々恭二. 地すべりダイナミクスの発展. 京都大学防災研究所年報. A, Vol. 50, No. A, pp. 93-109, 2007.