

DOI: 10.11779/CJGE2023S20046

# 液化过程中饱和砂土试样的电阻率变化特性

王炳辉<sup>1</sup>, 李松星<sup>1</sup>, 李炎<sup>1</sup>, 张雷<sup>\*1</sup>, 金丹丹<sup>2</sup>, 袁志华<sup>3</sup>

(1. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212000; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013;  
3. 清源智碳科技(合肥)有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要:**为了研究液化过程中饱和砂土孔隙结构的变化规律,基于砂土的孔隙结构与其电阻率之间存在定量关系的基本认识,自主研发了动三轴液化电测试验设备,建立了变高度等体积试样的电阻率计算方法,开展了不同相对密度和循环荷载幅值下饱和砂样的液化电测试验。结果显示:循环荷载作用初期,电阻率波动不明显,在孔压比较高、动应变出现较大波动时,饱和砂土试样的电阻率才出现明显的波动响应;循环末时刻的电阻率变化量随动荷载振次的增多而下降,并可划分为3个阶段:平稳下降阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段,且受到试样相对密度和动荷载幅值的显著影响;循环末时刻的电阻率变化量与孔压比存在反比函数关系,并在初始液化后继续减小。基于上述测试结果,探讨了液化过程中饱和砂土存在孔隙结构变化的规律性,为砂土液化过程数值模拟获得的细观结构变化规律提供试验依据。

**关键词:**饱和砂土;循环液化;电阻率;相对密度;循环加载

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0025-06

作者简介:王炳辉(1980—),男,博士后,副教授,主要从事土动力学及测试技术研究。E-mail: wbhchina@126.com。

## Variation characteristics of resistivity of saturated sand samples during liquefaction

WANG Binghui<sup>1</sup>, LI Songxing<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, JIN Dandan<sup>2</sup>, YUAN Zhihua<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Qingyuan Zhicarbon Technology (Hefei) Corporation, Hefei, 230000, China)

**Abstract:** In order to investigate the changes of pore structure of saturated sand during its liquefaction, an equipment for testing the electrical resistance of samples based on the dynamic triaxial equipments is independently developed based on the general understanding of the quantitative relationship between the pore structure and the electrical resistivity of sand. The electrical resistivities of samples with different relative densities under varied cyclic amplitudes of loading are tested, adopting the method for calculating the electrical resistivity of a sample with variable heights and invariable volume established. The experimental results show that the fluctuation of the electrical resistivity is not obvious at the initial stage of cyclic loading, and gradually more violent fluctuation when the pore pressure of the sample is relatively high and the dynamic strain fluctuation is relatively large. The amount of resistivity variation at the end of each cycles, which is affected by the relative density of the sand sample and the amplitude of dynamic load, decreases with the increase of vibration number and can be divided into three distinct stages: steady decline, rapid decline and slow decline. It is also inversely proportional to the pore pressure ratio, and continues to decrease after the initial liquefaction. Based on these test results, the specific regularities of pore structure changes in saturated sands during liquefaction are discussed. This study facilitates the understanding and evaluation of the liquefaction behavior of saturated sands from the perspective of pore structure changes.

**Key words:** saturated sand; cyclic liquefaction; resistivity; relative density; cyclic loading

## 0 引言

砂土液化是地震造成建筑结构破坏最重要的原因之一<sup>[1]</sup>。液化过程中,砂土颗粒自身平移、旋转、重新排列,以及粒间孔隙中流体(即孔隙水)的流动,两者相互关联的综合作用表现出砂土的宏观变形和强

度行为。砂土的孔隙结构及其变化作为砂土结构性的重要衡量指标之一<sup>[2]</sup>,在饱和砂土液化中因孔隙水流

基金项目:国家自然科学基金项目(51978317);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200996)

收稿日期:2023-11-30

\*通信作者(E-mail: lei.zhang@just.edu.cn)

动的影响，其作用显得尤为重要。

研究砂土液化过程中的孔隙结构变化以及结构特征，较传统的方法是通过宏观力学响应的对比分析进行研究。如 Amini 等<sup>[3]</sup>采用离心振动台和空心扭剪的液化试验，对比分析了不同前震作用或残余剪应变下饱和砂土再液化的不同响应，研究了各向异性对砂土抗液化强度的影响。相比于这种传统的间接方法，探测细观颗粒迁移或孔隙结构变化的方法则更为直接。这类研究方法根据所用技术手段的不同，主要可分为：固化切块技术、视觉图像统计分析技术，电阻率测试表征技术等。固化切块技术，有冷冻固化<sup>[4]</sup>和固化剂固化（如树脂固化技术<sup>[5]</sup>）等。固化后的试样切成小块，分别测试其孔隙比或其孔隙结构，用以研究饱和砂土试样在不同超孔压（即超静孔隙水压力）阶段中孔隙比的分布、制样方法产生的结构差异对液化响应的影响等问题。这种技术需要注意的是液化状态下砂样的固化过程带来的影响比较难以估计。视觉图像技术与透明容器结合，则是近些年学者研究砂土液化过程中结构变化特性的常用手段，如周健等<sup>[6]</sup>采用显微数码摄录技术结合离心机细观图像观测系统、CKC 型振动三轴仪，对液化前后砂土结构的变化进行探究分析。又如 Ye 等<sup>[7]</sup>采用工业相机和电镜扫描，结合数字图像处理技术和统计方法，分析了再液化行为及其细观机理以及试样不同制备方法对砂土液化特性的影响。上述研究拍摄的图像中的砂土是紧贴透明土箱侧面的，受容器边界的影响可能较为显著。

采用电阻率测试技术的研究成果，目前主要是土层探测反演、土性表征和液化势判别等方面。土性表征方面，于小军等<sup>[8]</sup>研究了电阻率与膨胀土膨胀量的关系；王炳辉等<sup>[9]</sup>基于对无黏性土的室内电测试验，给出了无黏性土的电阻率与压实度或孔隙率、含水率或饱和度等因素的关系。在液化势方面，Arulmoli 等<sup>[10]</sup>提出了砂土液化势的电阻率评价方法，段伟等<sup>[11]</sup>通过电阻率孔压静力触探技术进行土层电阻率测试，分别提出采用联合电阻率和状态参数评估饱和砂土的液化势。采用电测方法研究砂土液化过程中的结构变化，国内外鲜有文献报告。所幸 Archie<sup>[12]</sup>提出的结构因子

（即饱和砂土电阻率与其孔隙水电阻率的比值），以及 Dafalias 等<sup>[13]</sup>提出的结构因子张量等的概念，为评价砂土孔隙结构变化提供了理论依据。由于干砂（石英颗粒）电阻率很大，饱和砂土的电阻率取决于孔隙水的电阻率及孔隙水在砂土中的空间分布。因此，当忽略孔隙水电阻率在砂土试样受力变形过程中的变化时，饱和砂土电阻率就体现了砂土的孔隙结构。Jinguoji<sup>[14]</sup>的研究显示，电阻率测试技术是表征液化过程砂土结构变化十分有效的手段，为本文研究提供了

重要的技术性参考。

为了探索液化过程砂土孔隙结构的变化规律，本文引入电阻率测试技术，自主研发了动三轴液化电测试验设备，并测试了液化过程中饱和砂土的电阻，并建立了试样的电阻率计算方法，分析了不同相对密度的饱和砂试样在不同循环加载幅值下直流电源电阻率的变化特性。

## 1 动三轴液化电测试验

### 1.1 设备研发

本文的动三轴液化电测设备是在 DSZ-2 型电磁振动三轴仪（如图 1）基础上改造而成，主要分两部分：动三轴仪的改进部分，以及配套的土柱电阻率测试装置。改进部分主要是试样上下端座部分的改进。它是采用带小孔圆铜板作为电极，并用不导电的有机玻璃作为底座，制作成合适的形状和尺寸替换原动三轴仪的试样上下端座，实现试样电阻率测试的目的，如图 1 中的电测探头所示，详细描述见文献[15]。动三轴仪的应变范围为  $10^{-3} \sim 10^{-1}$ ，最大振动频率为 200 Hz，最大动应力为 500 kPa，试样尺寸为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

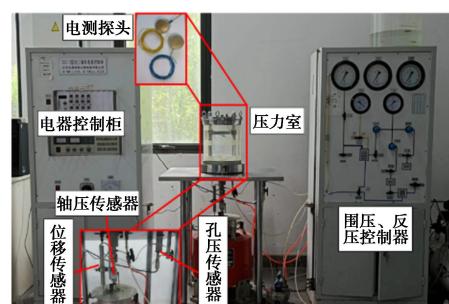


图 1 DSZ-2 型动三轴仪及电测探头

Fig. 1 DSZ-2 dynamic triaxial apparatus and electrical probes

配套的土柱电阻率测试装置，如图 2 所示。它由任意波形发生器、信号转换器和土柱试样电阻率测试系统组成。信号转换器是基于惠斯通单臂电桥二电极法开发的，与动三轴仪压力室内预埋的试样端座外接导线相连，任意波形发生器与信号转换器连接，上述所有部分联通组成完整的饱和砂土试样液化电测系统，详细描述见文献[15]。



图 2 土柱电阻率测试装置

Fig. 2 Sand column resistivity test devices

## 1.2 试验用砂

试样采用石英砂, 最大粒径 5 mm, 不均匀系数  $C_u$  为 5.95, 曲率系数  $C_c$  为 1.684, 级配良好, 其中粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量达 70%。石英砂的基本物理性质指标详见表 1。为了减少砂土颗粒本身携带的离子对循环饱和水中离子浓度的影响, 在试样制备前, 先根据试验要求的相对密度, 结合试样尺寸逐个计算每个试样所需的干砂质量, 然后用去离子水冲洗之后, 才作为试样的备土。

表 1 标准砂的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of standard sand

试样	$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$\rho_{d\max}/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{d\min}/(g \cdot cm^{-3})$
标准砂	2.70	0.824	0.399	1.93	1.48

## 1.3 试验方案和试验过程

饱和砂土液化电测试验的主要过程如下: 备土, 水沉法制样, 试样的循环饱和及其饱和度测试, 达到饱和度之后先开启电测设备, 然后再施加动荷载直至砂土液化试验达到试验停止条件, 最后停止电测设备。与常规动三轴液化试验相比, 增加了备土、开启和停止电测设备这 3 个步骤。为避免荷载的循环波动与电源信号周期波动之间的干扰, 试验时采用直流电源。为了消除直流电源测试产生的极化效应<sup>[16]</sup>, 在试样施加荷载之前先开启电测设备测试一段时间, 用于时程的基线修正。

为探索砂土液化过程中电阻率变化特性及其表征的砂样孔隙结构的变化规律, 本文试验仅考虑相对密度  $D_r$  和轴向动应力幅值  $\sigma_d$  这两个影响因素, 具体取值见表 2 所示, 表中循环应力比  $CSR=\sigma_d/(2\sigma_c)$ , 其中  $\sigma_c=100$  kPa 为均等固结的有效固结压力值。动荷载为 1 Hz 的正弦波。试验开始前, 测得砂样的 Skempton 孔压系数  $B$  值均大于 0.98。液化试验过程中砂样处于不排水条件, 即孔隙率保持不变。为了能考察初始液化后的响应特性, 试验停止条件为单幅应变达到 10%。

表 2 试验方案汇总表

Table 2 Summary of test schemes

试验编号	$D_r/\%$	$\sigma_d/kPa$	CSR
A1		30	0.15
A2	45	40	0.2
A3		50	0.25
B1		30	0.15
B2	55	40	0.2
B3		50	0.25
C1		30	0.15
C2	70	40	0.2
C3		50	0.25

## 1.4 饱和砂土孔隙溶液含盐量的选取

直流电源下土体电阻率测试时, 采用 500 Hz 的采样频率采集数据, 不可避免产生信号噪音, 噪音可能

会掩盖饱和砂土电阻率在液化过程中的波动信号。已有研究显示<sup>[9]</sup>, 噪音信号的幅值与溶液的离子浓度相关, 为了降低饱和砂土试样液化过程中信号噪音对电阻率测试结果的影响, 采用盐溶液替换去离子水降低孔隙水电阻率的电测方法。为选取合适的溶液浓度, 开展了不同 NaCl 含量溶液的电测试验。结果显示: NaCl 溶液电阻的噪音信号幅值随着 NaCl 的加入而降低。本文试验采用  $7296 \times 10^{-6}$  的盐溶液作为孔隙液。不考虑因含盐量增大导致孔隙水黏度增大产生的影响。

## 2 变高等积试样的电阻率计算方法

### 2.1 试样电阻时程的基线修正

由于直流电源测试土体电阻率存在极化效应, 因此根据极化效应的特点, 对试样电阻进行基线修正正是十分必要的。根据典型的试验结果, 试样原始电阻测试时程可分为三个阶段: 振动前、振动中和振动后阶段。振动前阶段, 试样电阻随时间逐渐增大, 该结果与周蜜等<sup>[16]</sup>的测试结果规律一致。在振动中阶段, 电阻值发生随试样高度变化而波动的现象更加明显。振动后阶段, 电阻总体平稳发展。根据电阻随时间变化的特点,  $t$  时刻试样的电阻值  $R_t$  采用  $R_t=R_0+A\exp(Bt)$  作为基线函数进行修正。 $A$ 、 $B$  为拟合参数。初始时刻电阻  $R_0$  值在 0.6 附近, 变动较小; 相关系数  $R^2$  在 0.9 以上, 指数函数的符合程度较高。通过基线修正后的电阻再进行平滑滤波处理。滤波后的电阻时程图相比于原数据时程图, 减少了“毛刺”现象。数据处理后的电阻时程图总体上明显消除了极化效应引起的电阻持续增长的现象。

### 2.2 试样电阻率的计算方法

根据电阻率的定义, 并考虑在动三轴液化试验中, 饱和砂土试样的高度和截面面积会随时间发生变化。试样电阻率在不同时刻发生着变化, 但它在试样中的分布认为都是均匀的。本文的电阻率采用肖兴等<sup>[17]</sup>提出的余弦模型电阻率方法进行计算, 从而得到的典型时程结果, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 电阻和电阻率时程中峰谷出现的时刻有明显的差异, 且与应力或应变有不同的对应关系。应力和应变处于压缩峰值附近时段, 电阻处于波谷时段, 而电阻率则是处于由小及大的升高阶段; 应力应变处于拉伸峰值附近时段时, 电阻处于峰值时段, 而电阻率则是由大及小的降低阶段。显然, 电阻时程与应变时程具有显著相关性, 电阻中包含了试样高度和截面面积变化的信息, 即试样长且细时电阻大、短而粗时则电阻小。若不考虑试样高度和截面面积的变化而直接采用初始试样高度和截面计算电阻率, 这样得到电阻率时程的波动与电阻波动一致, 显然是不合理的。因此, 计算电阻率

时，必须考虑试样高度和截面面积的变化。

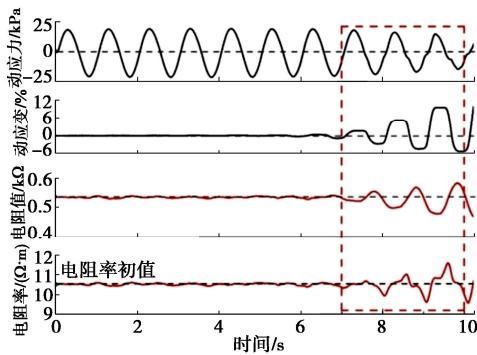


图3 试样的电阻率图

Fig. 3 Resistivity graph of samples

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 饱和砂土液化电测试验的典型时程

图4给出了相对密度 $D_r=55\%$ ，动应力 $\sigma_d=30\text{ kPa}$ 时试样的动三轴液化电测试验时程图。从中可以看出：①加载初期，饱和砂土试样的孔压比（超静孔隙水压力与初始有效围压的比值）逐周累积增长，但应变波动较小，电阻率波动也不明显，也就是说该阶段超孔压的升高没有引起砂样孔隙结构的明显变化。②当孔压比达到约0.6之后，试样开始产生较为明显的应变，电阻率也开始发生明显波动，且波动幅值随着振次的增加而快速增大，即当孔压比达到较高的程度后砂样才有明显的孔隙结构变化。③当达到初始液化后，应变和电阻率依然呈现明显波动，但电阻率波动幅值的增幅相对较为缓慢。④在试样从受拉到受压的状态变化时段（或每周循环加载的末时刻附近），试样电阻率处于波谷时段，而试样从受压到受拉的状态变化时段（或每周循环加载的中间时刻附近），电阻率则处于波峰时段附近，试样的超孔压则对应于两个峰值时段附近。试样应变在最大和最小值附近时，电阻率则分别处于增大或减小阶段。其他试样的液化电测试验结果均具有相似规律。

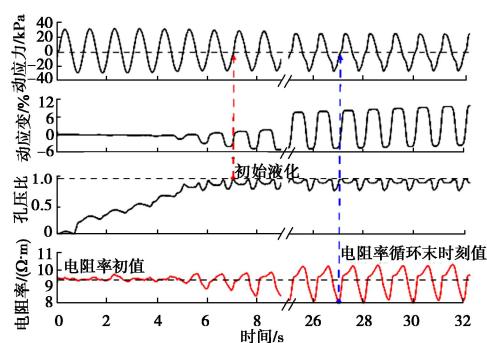


图4 不同砂土试样的动应力、轴向应变、孔压比和电阻率与振次的时程曲线( $D_r=55\%$ )

Fig. 4 Time-history curves of dynamic stress, axial strain, pore pressure ratio, resistivity and vibration times of different sand samples ( $D_r=55\%$ )

相对密度 $D_r=45\%$ 和 $70\%$ 的工况试验结果也有上述相似的规律。

#### 3.2 循环末时刻电阻率的发展特性

循环荷载末时刻砂土的状态，综合反映了饱和砂土初始状态下作用循环荷载后发生的状态变化，该时刻饱和砂土的状态具有显著的代表性。在饱和砂土液化试验结果分析中十分常用，如超孔压累积增长模型的建立时，常以循环末时刻作为典型时刻进行分析。在此也采用循环末时刻的电阻率分析其累积发展的规律。

图5给出了相对密度 $D_r=55\%$ 的饱和砂土试样循环末时刻电阻率变化量的发展。可以看出：循环末时刻电阻率变化量呈现3个阶段：平稳减小阶段、迅速减小阶段和缓慢减小阶段。虽然部分电阻率变化量因试样应变达到试验停止条件而未采集到缓慢减小阶段，但从发展趋势来看，电阻率变化量的缓慢减小阶段存在的可能性是比较大的。

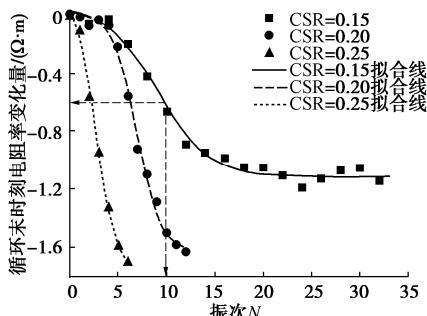


图5 循环末时刻电阻率变化量随振次的发展( $D_r=55\%$ )

Fig. 5 Trend of resistivity variation at end of cycle ( $D_r=55\%$ )

对比相同相对密度不同循环荷载幅值下、以及不同相对密度相近幅值下的电阻率变化量，可以看出：①相同相对密度条件下，循环荷载幅值越大，电阻率变化量达到特定值所需的循环振次明显减少，荷载越小，则规律相反。②在相近的循环荷载幅值条件下，砂土相对密度越大，电阻率的累积变化量达到某一数值时所需的循环振次越多。这一结果与砂样宏观响应规律具有内在联系。即砂样密度越大、荷载越小，相同振次下产生的电阻率变化量越小，对应宏观响应（应变或孔压比）增长量越小，达到液化所需的循环振次越多；反之则相反。因此，循环末时刻电阻率变化量可表征砂土结构的变化程度，且可作为饱和砂土液化的破坏指标，用以评价其抗液化强度。相对密度 $D_r=45\%$ 和 $70\%$ 的工况试验结果也有相似的上述规律。

#### 3.3 循环末时刻电阻率变化量和孔压比的关系

将上述的循环末时刻电阻率变化量与循环末时刻的孔压比建立关系，如图6所示，可以看出：

(1) 初始阶段，循环末时刻的电阻率出现较小变化量就产生了较大的孔压比增量；然后两者的变化出现相反发展速率的过渡期，即电阻率的变化量越来越

明显而相应孔压比的变化则越来越不明显; 最后孔压比不变的情况下, 循环末时刻电阻率变化量则持续减小; 两者总体上呈较好的反比关系。

(2) 初始液化之后, 虽然孔压比为 1.0, 受力状态几乎保持不变, 但试样的电阻率变化量在持续减小。电阻率的变化, 是砂样孔隙结构变化的体现。从而说明初始液化后, 在循环荷载作用下, 即使受力状态几乎没有发生变化, 砂土的孔隙结构依然发生着变化, 从而产生应变的逐周增长的发展。这与 Higuchi 等<sup>[18]</sup>采用离心振动台试验得出的液化后震动持续时间越长地表沉降越大的结论相似, 都是液化后砂土的结构因动载作用而仍持续发生变化的宏观表现。沈珠江院士<sup>[19]</sup>曾提出土体中的应力与应变之间, 需要有“结构变化”这座桥梁。而电阻率变化量一定程度上具有桥梁的功能, 体现了液化后砂土结构继续发生变化的特性。

(3) 相同的动应力条件下, 相对密度越大的砂土达到初始液化时的循环末时刻电阻率变化量越小。也就是说较密实的砂土达到初始液化虽然经受了更多的振次, 但其孔隙结构相对初始时刻的变化依然是相对较小的。这说明中密到密实的砂土在往返活动性(或循环液化)<sup>[1]</sup>现象中孔隙结构变化相对较少。

动应力分别为  $\sigma_d=30 \text{ kPa}$  和  $50 \text{ kPa}$  情况下的试验结果也有上述相似的规律。

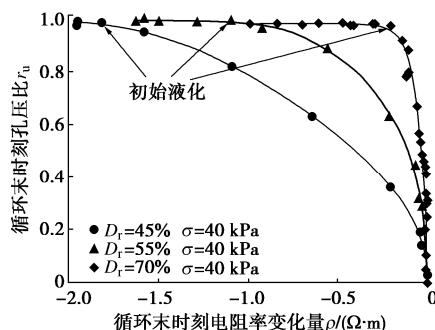


图 6 循环末时刻的电阻率变化量与孔压比之间的关系

Fig. 6 Relationship between amount of resistivity change and pore pressure ratio at end of cycle

#### 4 砂土的孔隙结构及其电阻率的讨论

本文试验中的试样处于完全不排水的条件, 即整个过程中试样的孔隙率不变。根据已有研究资料, 饱和砂土孔隙率  $n$  与其电阻率  $\rho$  之间存在指数函数关系, 如  $\rho = \alpha \rho_w n^{-\beta}$ <sup>[20]</sup>, 式中  $\rho_w$  为孔隙水的电阻率,  $\alpha$  和  $\beta$  为试验参数。根据本文试验结果, 试样的孔隙率不变情况下, 其电阻率发生了波动变化, 说明某个孔隙率可以因砂土孔隙结构的变化而有多个电阻率值与之对应。饱和砂土孔隙率  $n$  与其电阻率  $\rho$  之间的关系, 受到孔隙结构的影响十分显著。

需要指出的是, 饱和砂土试样的循环末时刻电阻率出现的逐周减小的现象, 且这一现象发生的过程中, 试样仅仅是孔隙结构发生了变化, 它的体积和孔隙率没有变化。笔者通过绝缘圆柱体移动模拟二维圆颗粒移动开展了电阻率测试试验, 发现在体积和孔隙率不变的情况下, 圆颗粒集合体电阻率的降低与圆颗粒移动发生孔隙结构均匀化变化相关。因此, 本文试验中电阻率的降低是砂土中孔隙结构均匀化过程的宏观物理量的体现, 其中, 孔隙结构均匀化是砂土中孔隙较大之处变小, 而孔隙较小之处变大的过程。这与沈珠江院士<sup>[21]</sup>提出的“孔隙均匀化原理”具有相同的内涵, 都是指孔隙分布的均匀化。但与本文孔隙均匀化重构在外延上与“孔隙均匀化原理”有所不同。上述从孔隙的视角获得砂土液化过程中的细观变化规律, 与相关数值模拟获得的结果相辅相成。如文献[22, 23]的数值模拟结果显示: 液化过程中相邻颗粒由相互接触逐渐脱离, 接触点(或配位数)逐渐减少, 甚至出现颗粒完全悬浮于孔隙水的过程。因此, 本文结果能为砂土液化过程的数值模拟关于细观统计规律的正确性提供试验依据。

### 5 结 论

为探测饱和砂土试样在循环动荷载作用下的孔隙结构变化规律, 自主研发了动三轴液化电测试设备, 建立了等体积变高度饱和砂土试样电阻率计算方法, 分析直流电源条件下饱和砂土试样的液化电测试试验结果, 得出如下主要结论:

(1) 随着循环荷载作用, 饱和砂土试样的电阻率先平稳减小, 然后出现显著的波动变化; 电阻率时程的波谷与循环荷载末时刻有较好的对应关系。

(2) 饱和砂土的循环末时刻电阻率, 随振次的增加逐渐减小, 并且可分为平稳减小、迅速减小和缓慢减小这 3 个阶段, 迅速减小阶段发生在孔压比较大时, 约为 0.6~1.0 之间, 缓慢下降阶段发生在孔压比保持在 1.0 时。饱和砂土的循环末时刻电阻率变化量与孔压比之间有较为明显的反比函数关系。

(3) 在液化过程中饱和砂土的循环末时刻电阻率变化量发生逐渐减小的过程, 表征了砂土孔隙结构变化的特定规律性, 是孔隙均匀化重构的体现。该变化量可作为定量指标评价饱和砂土的液化行为。

### 参考文献:

- [1] IDRISI I M, BOULANGER R W. Soil liquefaction during earthquakes[M]. Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [2] ODA M, KONISHI J, NEMAT-NASSER S. Some

- experimentally based fundamental results on the mechanical behaviour of granular materials[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 479-495.
- [3] FARDAD AMINI P, HUANG D R, WANG G, et al. Effects of strain history and induced anisotropy on liquefaction resistance of Toyoura sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, **147**(9): 04021094.
- [4] CASAGRANDE A, RENDON F. Gyratory shear apparatus: design, testing procedures, and test results on undrained sand[R]. 1978.
- [5] KNODEL P C, IBRAHIM A A, KAGAWA T. Microscopic measurement of sand fabric from cyclic tests causing liquefaction[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1991, **14**(4): 371-382.
- [6] 周健, 史旦达, 吴峰, 等. 基于数字图像技术的砂土液化可视化动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(1): 81-87. (ZHOU Jian, SHI Danda, WU Feng, et al. Visualized cyclic triaxial tests on sand liquefaction using digital imaging technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(1): 81-87. (in Chinese))
- [7] YE B, HU H L, BAO X H, et al. Reliquefaction behavior of sand and its mesoscopic mechanism[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, **114**: 12-21.
- [8] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 393-396. (YU Xiaojun, LIU Songyu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(3): 393-396. (in Chinese))
- [9] 王炳辉, 王志华, 姜朋明, 等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1739-1745. (WANG Binghui, WANG Zhihua, JIANG Pengming, et al. Electrical resistivity characteristics of saturated sand with varied porosities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(9): 1739-1745. (in Chinese))
- [10] ARULMOLI K, ARULANANDAN K, SEED H B. New method for evaluating liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **111**(1): 95-114.
- [11] 段伟, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于多功能 CPTU 测试的无黏性土状态参数评价研究[J]. 中国公路学报, 2022, **35**(1): 200-209.
- [12] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, **146**(1): 54-62.
- [13] DAFALIAS Y F, ARULANANDAN K. The formation factor tensor in relation to structural characteristics of anisotropic granular soils[C]// BOEHLER J P. *Mechanical Behavior of Anisotropic Solids/Comportement Mécanique des Solides Anisotropes*. Dordrecht: Springer, 1982: 183-198.
- [14] JINGUANJI M, TOPRAK S, KUNIMATSU S. Visualization technique for liquefaction process in chamber experiments by using electrical resistivity monitoring[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, **27**(3): 191-199.
- [15] 王炳辉. 在动三轴中实现电阻率测试的装置 201820109496X.
- [16] 周蜜, 王建国, 黄松波, 等. 土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3269-3275.
- [17] 肖兴, 王炳辉, 王丽艳, 等. 液化过程中饱和砂土的电阻率测试及其计算方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, **43**(1): 107-111.
- [18] HIGUCHI S, EJIRI J. Influence of the earthquake motion characteristics on the ground settlement behavior due to liquefaction[C]// Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, 2012: 789-800.
- [19] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. 力学与实践, 1998, **20**(6): 1-6.
- [20] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [21] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [22] WANG R, FU P C, ZHANG J M, et al. Fabric characteristics and processes influencing the liquefaction and re-liquefaction of sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, **125**: 105720.
- [23] WANG G, WEI J T. Microstructure evolution of granular soils in cyclic mobility and post-liquefaction process[J]. *Granular Matter*, 2016, **18**(3): 1-13.

(编校: 明经平)