

动态土工真三轴仪在砂土液化研究中的应用

许成顺^{1,2}, 刘海强¹, 杜修力^{1,2}, 尹占巧¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 首都世界城市顺畅交通北京市协同创新中心, 北京 100124)

摘要: 为了模拟实际场地中土体变形和强度特性, 研究开发了揭示侧限条件下饱和砂土震动液化机理的试验方法。文中采用了动态真三轴试验系统, 该设备采用刚性板加柔性面的混合边界加载装置, 并应用先进的 CATS 试验控制系统。试验结果表明应用动态土工真三轴仪进行砂土液化实验是可行的, 并初步分析了侧限条件下的液化机理, 即土体将在轴向压力、侧压和孔隙水压力相等的条件下发生液化, 表明振动荷载过程中的应力重分布对砂土液化强度和孔隙水压力发展等具有显著的影响。

关键词: 动态真三轴仪; 砂土液化; 侧限条件; 孔隙水压力

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)10-1895-06

作者简介: 许成顺(1977-), 女, 副教授, 从事岩土力学基础理论与试验研究。E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn。

Application of dynamic true triaxial apparatus to study on sand liquefaction

XU Cheng-shun^{1,2}, LIU Hai-qiang¹, DU Xiu-li^{1,2}, YIN Zhan-qiao¹

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100124, China)

Abstract: A test method is developed to simulate the deformation and strength characteristics of soils in real sites. This test method reveals the mechanism of seismic liquefaction of saturated sand under confined condition. A dynamic true triaxial test system is applied. This device provides mixed boundary conditions for samples and installation of advanced CATS test control system. The test results show that use of the dynamic true triaxial apparatus for sand liquefaction test research is feasible. Moreover, the mechanism of soil liquefaction under confined condition is investigated. Namely, the liquefaction will be generated when the axial and lateral pressures as well as the pore water pressure are equal to each other. It indicates that in the process of vibration load, the stress redistribution has a significant influence on the strength of sand liquefaction and the development mode of pore water pressure.

Key words: dynamic true triaxial apparatus; sand liquefaction; confined condition; pore water pressure

0 引言

近些年全球范围内频繁发生地震, 地基液化现象作为地震灾害的一种主要形式, 常常会引起建筑物基础的不均匀沉降及结构的破坏, 造成严重灾害和人员伤亡, 给人类带来巨大灾难。2011年2月发生的新西兰 6.3 级地震, 液化现象突出, 由于地震液化造成的地基失效, 导致克莱斯特彻奇市内 26 万吨土壤严重流失(克莱斯特彻奇市区内 60%~80%喷水冒砂)。日本 9.0 级大地震同样出现了喷水冒沙、地面下沉等大面积液化现象, 斯科特·阿什福德表示:“我们以前在震中附近地区看到过如此极端的土壤液化现象, 不过日本的液化现象发生地距震中的距离以及造成破坏的程度是异乎寻常的”。

两次大面积地震液化使人们重新认识到土体液化问题的复杂性和深入研究的必要性, 它具有重要的理

论价值和实用意义, 也是岩土地震工程界一直以来非常关注的问题。

室内试验研究是进行地震液化研究的主要手段, 大致可分为两类: 一类是大尺寸模型试验; 另一类是小尺寸单元体试验。振动台^[1-3]和离心机^[4]是两种典型的大尺寸模型试验。关于小尺寸单元体试验, 动单剪仪^[5]、动三轴仪^[6]、动扭剪仪^[7-8]及竖向-扭剪耦合剪切仪^[9-15]已经得到较多的应用。

而以目前所具有的室内试验条件, 揭示液化机理尚存在诸多问题, 例如在非均等固结条件下, 在动荷载作用过程中, 孔隙水压力稳定在某一水平, 并不发生初始液化现象, 因此无法按照通常的初始液化定义

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278015); 北京市教委重点项目(KZ201210005010); 国家 973 计划项目课题(2011CB013600)

收稿日期: 2013-02-26

（即孔隙水压力达到平均固结应力）作为液化破坏标准。目前常用应变达到某一水平作为液化判断标准，并且通过室内试验得到的孔隙水压力发展模式与实际情况也并不相符。

谢定义曾指出，在实际场地中土体的变形会受到周围土体的约束，即土体的侧限条件。然而，上面所提到的常规试验均不能模拟实际土体中这种有限刚度侧限的边界条件^[16-17]，作者认为这是常规试验不能揭示液化机理的根本原因。

本文拟利用动态土工真三轴仪，通过控制围压限制试样的变形，从而模拟实际场地中土体的侧限边界条件。

1 动态真三轴仪试验技术

本文所利用的动态真三轴仪试验系统主要由 4 部分组成，包括三轴压力室、压力控制面板、数据采集控制器和动力供应系统。整套系统配有 3 个内置式压力传感器，4 个 LVDT 位移传感器，以及 6 个压力作动器。内置式的压力传感器消除了普通的外置式传感器由于摩擦产生的误差，LVDT 位移传感保证了试验过程中对试样变形的精确量测。

真三轴仪的加载方式有 3 种：刚性加载、柔性加载和混合加载^[18-19]。该设备的加载装置属刚性板加柔性面的混合加载装置，如图 1 所示，竖向活塞通过竖向加载板对土样施加竖向压力，水平向压力由水平向加载板施加，横向压力由压力室内的无气水施加。3 个方向的应力、应变通过荷载及位移传感器测量，其中 σ_v ， σ_h ， σ_t 和 ε_v ， ε_h ， ε_t 分别表示竖向、水平向、横向的应力和应变。

在系统设置中选定主控作动器的基础上，利用某一参数作为主控反馈信息可以实现两个相对作动器的联动控制（如，右侧作动器为主动控制，左侧作动器为从动控制）。在本文所进行的试验中，顶部作动器和右侧作动器为主控作动器，利用位移变量分别对底部作动器和左侧作动器进行联动。因此，在试验过程中相对的作动器将产生相对的位移，使试样始终处在 4 块加载板的中间，保证试样变形及受力的均匀性。

数据采集控制器安装了 CATS 自动试验软件，利用伺服反馈控制系统，可以设定需要控制的变量作为反馈信息，然后利用 PID 算法调整输出通道的数据使其符合实时的目标指令，例如 K_0 固结过程，在设定固结程序时，竖向应力以某一速率增加到预定值，围压则控制侧向位移为 0。这时将光纤传感器测量的侧向变形反馈给伺服控制系统，通过自动调节侧向压力限制竖向应力增加过程中试样的侧向变形。在 k_0 固结中，将试样的侧向变形基本控制在 0.005% 左右，如图 2 所

示。该反馈系统的成功应用为实现侧限条件试验提供了技术支持。

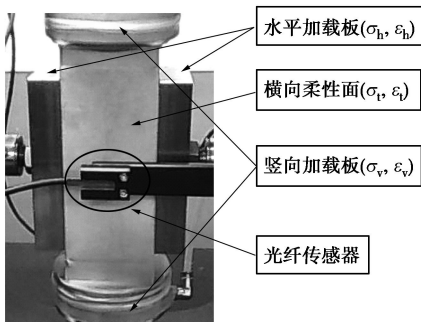


图 1 加载装置及其各方向应力应变分量

Fig. 1 Loading devices and stress strain components

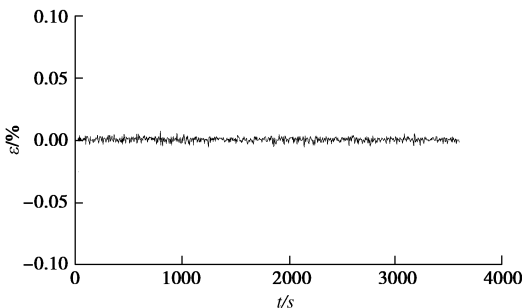


图 2 K_0 固结过程中的侧向应变

Fig. 2 Lateral strain in K_0 consolidation progress

2 真三轴试验及砂土液化机理分析

目前国内外尚未见利用真三轴仪开展动态试验的有关实验结果，为了研究侧限条件下饱和砂土的液化特性，本文采用粉细砂分别进行了均等固结条件和非均等固结条件下的常规砂土液化试验及侧限条件下的液化试验。试验采用重塑土，试样尺寸为 75 mm×75 mm×150 mm。采用通 CO₂ 和加反压的双重饱和法，最终饱和度均达到 97% 以上。试验条件见表 1。

表 1 动态真三轴试验条件

Table 1 Test conditions of dynamic true triaxial tests

试验类型	固结条件/kPa	固结比	动荷载幅值/kPa
常规试验 1	$\sigma_v=100, \sigma_h=100, \sigma_t=100$	$K_C=1.0$	$\sigma_{vd}=20$
常规试验 2	$\sigma_v=100, \sigma_h=50, \sigma_t=50$	$K_C=2.0$	$\sigma_{vd}=20$
侧限试验 3	$\sigma_v=100, \sigma_h=50, \sigma_t=50$	$K_C=2.0$	$\sigma_{vd}=20$
侧限试验 4	$\sigma_v=200, \sigma_h=100, \sigma_t=100$	$K_C=2.0$	$\sigma_{vd}=35$

图 3 给出了常规三轴剪切试验得到的轴向动应力时程曲线和轴向动应力 - 应变关系。图 3 (a) 表明动荷载波形比较稳定，基本达到了所要求的应力幅值。图 3 (b) 表明在均等固结条件下，试样的轴向应变随着动荷载的施加起初表现出明显的循环效应，当试样液化后累积变形更加明显^[20]。图 4 为均等固结及偏压

固结的孔隙水压力时程曲线, 其变化规律符合常规动三轴试验^[6, 20]及动扭剪试验^[14]的结果。这表明利用动态真三轴仪进行砂土液化试验研究是可行的。

值得注意的是, 从图4可以看出, 在均等固结条件下, 随着振动次数的增加, 孔隙水压力逐渐累积直至与围压相等, 有效应力降为0; 而在非均等固结条件下, 在动荷载作用过程中孔隙水压力稳定在某一水平, 其强度似乎不衰减, 并不发生初始液化现象。

实际上, 当土体受到振动荷载作用时, 孔隙水压力的发展将会引起土体的软化而发生侧向变形, 而侧向变形受到侧向约束作用, 从而引起侧向应力的增大, 即应力将发生重新分布。

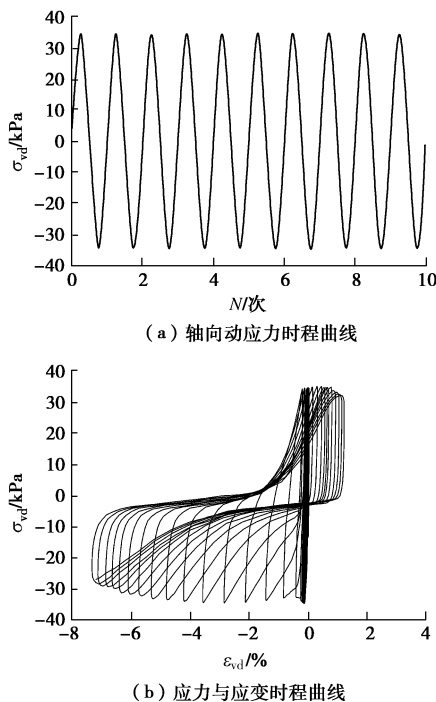


图 3 常规动三轴剪切试验实测轴向动应力与轴向应变时程曲线

Fig. 3 Measured curve of axial dynamic stress and axial strain by conventional dynamic triaxial shear tests

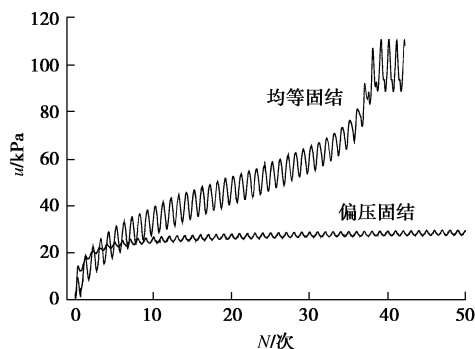


图 4 常规动三轴试验孔隙水压力时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of pore water pressure by conventional dynamic triaxial shear tests

为了模拟上述应力重分布现象, 在验证了试验系

统稳定性的基础上, 本文利用该设备进行了侧限条件下的饱和砂土液化试验, 即在加载过程中限制试样的侧向变形。试验过程中, 利用闭环式回路反馈系统, 拟定了两种方法实现侧限条件: ①利用光纤传感器测得的侧向位移作为反馈信息, 调整围压限制试样的侧向变形; ②利用竖向位移作为反馈信息, 调整围压通过控制竖向位移达到侧限的目的。试验中发现: 由于在动荷载作用下, 光纤传感器测量的侧向位移不能正确的反映试样的整体变形, 导致轴向应变产生不可恢复的拉伸变形, 如图5所示(方法一), 因此所得的试验数据准确性不高; 另外饱和砂土试样可近似为不可压缩体, 通过限制试样的竖向变形同样能达到侧限条件, 并且由于利用LVDT传感器通过刚性活塞连接的刚性加载板测得的竖向位移非常准确, 如图5中方法二所示, 竖向变形基本得到了控制, 因此本文选用了第二种方法进行侧限试验。

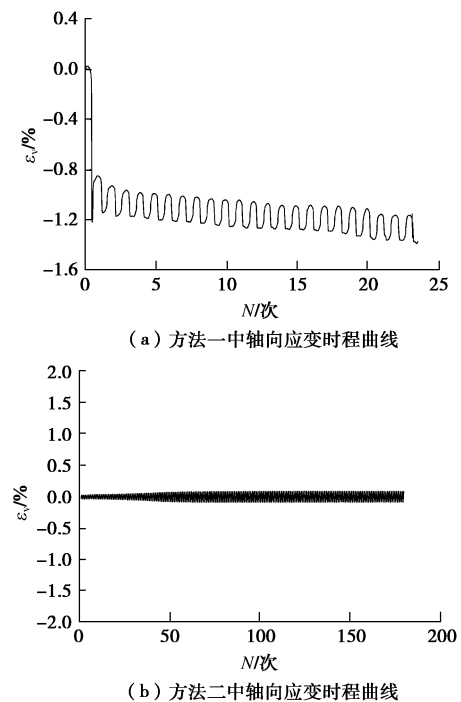


图 5 侧限方法中轴向应变时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of axial strain in confined methods

为了考虑侧限及常规情况下的土体动力响应, 下面重点对比分析孔隙水压力时程曲线: 图6给出了常规试验2和侧限试验3的孔隙水压力时程曲线, 可见相同的固结条件以及相同的动荷载水平下, 孔隙水压力的发展趋势显示出明显的差异, 即常规试验中, 孔隙水压力达到一定水平以后趋于稳定, 而在侧限条件下孔隙水压力发展远远超过常规试验中孔隙水压力的增长水平, 最终增大到与竖向应力相等。其主要原因与侧向压力的重新分布有关。图7(a)给出了侧限试验3中土体承受振动荷载作用时的轴向压力、侧压以及孔

隙水压力的时程曲线,可以看出在侧限条件下,土体在动荷载作用过程中,因软化而引起的侧向变形受到约束,使土体周围的应力发生重新分布,此时孔隙水压力还可以继续升高,从而导致侧压的继续增大,直到侧压增大到与轴压相等,孔隙水压力增大到等于侧压,最终在轴向压力、侧压和孔隙水压力相等的条件下土体发生了液化。图7(b)所示,有效应力和抗剪强度逐渐降低趋近于0,最终发生液化。

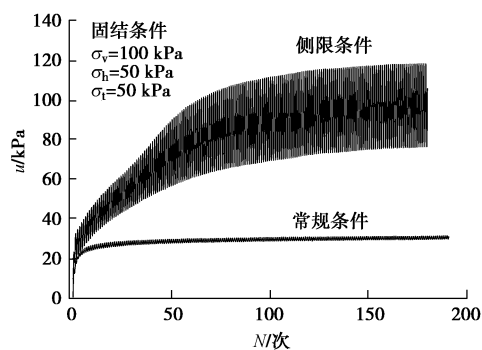


图6 侧限条件与常规条件下孔隙水压力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of pore water pressure under confined and conventional conditions

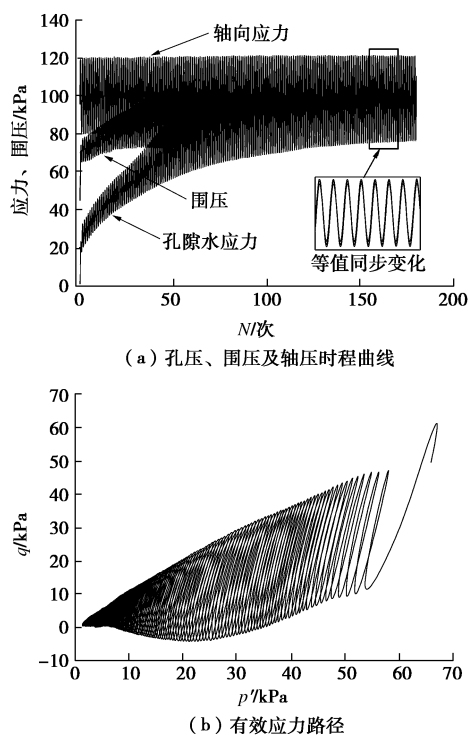
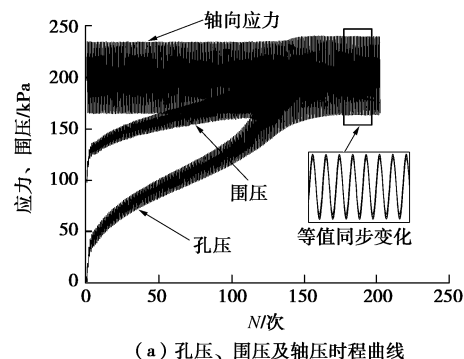


图7 侧限试验3的应力曲线

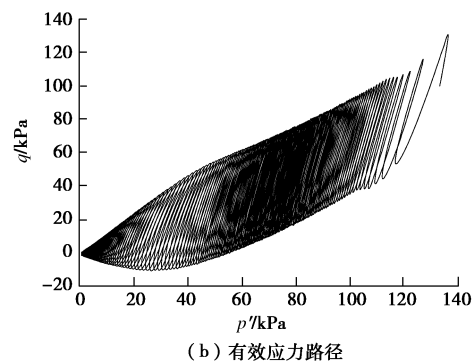
Fig. 7 Stress curves of confined test No. 3

图8(a)给出了不同固结压力下的轴向应力、侧向压力和孔隙水压力的时程曲线。同样说明了当土体的侧向变形受到约束时,侧向应力增加显著,同时孔隙水压力发展与常规情况相比非常显著,最后土体在轴向应力、侧向压力和孔隙水压力均相等的情况下发

生了液化。如图8(b)所示,饱和砂土的有效应力和抗剪强度逐渐减小趋近于0,最终发生液化。这为合理解释非均等固结条件下的土体大面积液化及液化机理分析提供了强有力的试验支撑。



(a) 孔压、围压及轴压时程曲线



(b) 有效应力路径

图8 侧限试验4的应力曲线

Fig. 8 Stress curves of confined test No. 4

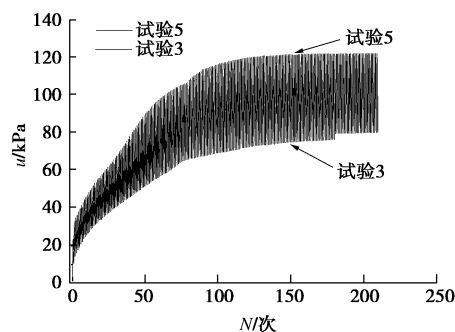


图9 孔隙水压力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of pore water pressure

以上4个试验中试样4个柔性面上的压力均是利用无气水施加的,未使用水平加载板施加水平向应力。本文尝试了利用水平加载板施加水平应力,即设计了试验5与试验3做比较。在试验5中,利用水平加载板施加水平应力 $\sigma_h = 50$ kPa,加载过程中控制水平加载板的位移为0,其他条件与试验3相同。所得试验结果如图9及图10所示,由图可知两种方法所得试验结果基本相同,可消除水平加载板对试验结果的影响,这为进一步进行非对称荷载下的饱和砂土液化试验提供保障。

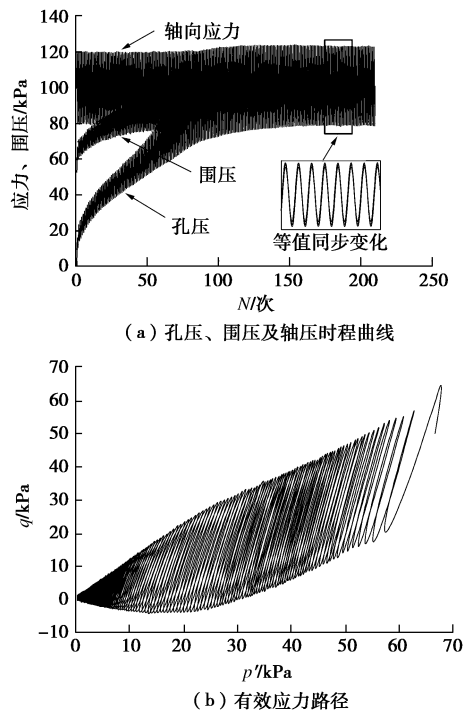


图 10 侧限试验 5 的应力曲线

Fig. 10 Stress curves of confined test No. 5

3 结 语

目前国内外还未见利用真三轴仪进行饱和砂土震动液化的试验,而常规的试验不能准确地模拟实际土体中有限刚度的侧限条件,这被认为是偏压条件下饱和砂土不能达到初始液化的根本原因,因此本文利用动态真三轴仪开发了一种能够实现侧限条件的试验方法。对试验结果的分析表明:侧限条件下土体的液化特性与常规试验的液化特性存在显著的差异。在侧限条件下,由于孔隙水压力的增加引起的土体软化受到侧向约束,土体周围的侧向压力将会发生重分布。应力的重分布导致土体的孔隙水压力发展模式发生变化,最终孔隙水压力增大至等于侧向压力,侧向压力增大至等于轴向压力,土体发生液化。

在本文试验研究的基础上,结合真三轴仪独立控制 3 个正交方向应力应变的加载特点,今后尚需进行大量的试验,研究侧限条件下多种因素(如:中主应力系数,固结比,平均有效应力,动荷载幅值等)对孔隙水压力以及动强度特性的影响。

参考文献:

[1] PYKE R M, SEED H B, CHAN C K. Settlement of sands under multi-directional shaking[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, **101**(4): 379 - 398.

[2] PRAKASH S, MATHUR J N. Liquefaction of fine sand under dynamic loads[C]// Proceedings of the 5th Symposium of the Civil and Hydraulic Engineering Departments. Bangalore, India: Indian Institute of Science, 1965.

[3] SEED H B, PYKE R M, MARTIN G R. Effect of multidirectional shaking on pore pressure development in sands[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, **104**(1): 27 - 44.

[4] FIEGEL G L, KUTTER B L. Liquefaction mechanism for layered soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(4): 737 - 755.

[5] ISHIHARA K, YAMAZAKI F. Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading[J]. Soils and Foundations, 1980, **20**(1): 45 - 59.

[6] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sand during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966, **92**(6): 105 - 134.

[7] 牛建新, 汪闻绍. 循环扭剪试验中饱和砂土的某些动力特性[J]. 水利学报, 1994(5): 77 - 83. (NIU Jian-xin, WANG Wen-shao. Some dynamic properties of saturated sands with torsional shear apparatus[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(5): 77 - 83. (in Chinese))

[8] 王 刚, 张建民. 砂土液化大变形的弹塑性循环本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 51 - 59. (WANG Gang, ZHANG Jian-min. A cyclic elasto-plastic constitutive model for evaluating large liquefaction-induced deformation of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 51 - 59. (in Chinese))

[9] 郭 莹, 栾茂田, 何 杨, 等. 主应力轴持续旋转条件下饱和松砂的振动孔隙水压力特性[J]. 地震工程与工程振动. 2007, **27**(3): 156 - 162. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, HE Yang, et al. Dynamic pore water pressure behavior for saturated loose sand under condition of continuous rotation in principal stress direction[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, **27**(3): 156 - 162. (in Chinese))

[10] 郭 莹, 栾茂田, 何 杨, 等. 主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 403 - 409. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, HE Yang, et al. Effect of variation of principal stress orientation during cyclic loading on undrained dynamic behavior of saturated loose sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 403 - 409. (in Chinese))

[11] 郭 莹, 栾茂田, 许成顺, 等. 主应力方向变化对松砂不

- 排水动强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 666 - 670. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, et al. Effect of variation of principal stress orientation on undrained dynamic strength behavior of loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 666 - 670. (in Chinese))
- [12] 栾茂田, 金 丹, 许成顺, 等. 双向耦合剪切条件下饱和松砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 790 - 794. (LUAN Mao-tian, JIN Dan, XU Cheng-shun, et al. Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 790 - 794. (in Chinese))
- [13] 郭 莹, 刘艳华, 栾茂田, 等. 复杂应力条件下饱和松砂振动孔隙水压力增长的能量模式[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1380 - 1385. (GUO Ying, LIU Yan-hua, LUAN Mao-tian, et al. Energy-based model of vibration-induced pore water pressure build-up of saturated loose sand under complex stress condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1380 - 1385. (in Chinese))
- [14] 郭 莹, 栾茂田, 何 杨, 等. 复杂应力条件下饱和松砂孔隙水压力增长特性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3): 139 - 144. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, HE Yang, et al. Experimental study on development pattern of shaking-induced pore water pressure of saturated loose sand under complex loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3): 139 - 144. (in Chinese))
- [15] 栾茂田, 金 丹, 张振东, 等. 饱和松砂的双向耦合剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 319 - 325. (LUAN Mao-tian, JIN Dan, ZHANG Zhen-dong, et al. Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 319 - 325. (in Chinese))
- [16] 谢定义. 饱和砂土液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90 - 98. (XIE Ding-yi. Some problems in liquefaction of saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 90 - 98. (in Chinese))
- [17] 魏茂杰, 谢定义. 往返荷载下饱和砂土液化的应力条件及其演化过程[C]// 第三届全国土动力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990. (WEI Mao-jie, XIE Ding-yi. Stress condition and its development of liquefaction of saturated sand[C]// The Paper Collection of the Third National Academic Conference of Soil Dynamics. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese))
- [18] 殷建华, 周万欢, Md Kumruzzaman, 等. 新型混合边界真三轴仪加载装置及岩土材料试验结果[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 493 - 499. (YIN Jian-hua, ZHOU Wan-huan, Md Kumruzzaman, et al. New mixed boundary true triaxial loading device for testing study on 3-D stress-strain-strength behaviour of geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 493 - 499. (in Chinese))
- [19] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用[J]. 岩土工程技术, 2003(5): 289 - 293. (ZHANG Kun-yong, YIN Zong-ze, XU Zhi-wei. Development and application of true triaxial apparatus in China[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(5): 289 - 293. (in Chinese))
- [20] 王星华, 周海林. 固结比对饱和砂土液化的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2001(6): 122 - 127. (WANG Xing-hua, ZHOU Hai-lin. Effect of the consolidation ratio on saturated sand liquefaction[J]. China Railway Science, 2001(6): 122 - 127. (in Chinese))