双向耦合剪切条件下饱和松砂的液化特性试验研究

栾茂田[1, 2]，金 丹[1, 2]，许成顺[3]，张其一[1, 2]，张振东[1, 2]

（1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；2. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所，辽宁 大连 116024；3. 北京工业大学建筑工程学院，北京 100022）

摘 要：为了模拟海床及海洋建筑物遭受波浪荷载时所引起的循环应力，进行了一系列均等固结条件下的应力控制式轴向－扭转双向耦合循环剪切试验。加载路径在$\sigma_d/2-\tau$应力空间内为椭圆。试验在保证椭圆面积不变的情况下，分别变化竖向和扭转向的荷载分量幅值，以此来探讨双向耦合剪切试验中各个分量的变化对饱和松砂的循环强度特性的影响。试验结果表明砂土在双向耦合荷载作用下，其液化强度与加载椭圆路径的面积和两个荷载分量比值密切相关。当轴向应力与剪应力幅值的比值保持不变时，砂土液化强度随着椭圆面积的增大而降低。而在椭圆面积保持不变时，当竖向与扭转向荷载分量的比值小于某一临界值0.6～0.75时，砂土液化强度随着比值的增加而增大，当竖向与扭转向荷载分量的比值大于某一临界值0.6～0.75时，砂土的液化强度随着比值的增加而减小，在临界值0.6～0.75之间表现出最高的强度。另外，在一个周期内孔隙水压力的循环变化与轴向应力相位一致，与循环剪应力相位相差90°。

关键词：饱和松砂；轴向－扭转双向耦合剪切试验；椭圆面积；液化强度；临界值；孔压

中图分类号：TU411.8 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)06－0790－05

作者简介：栾茂田(1962－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事岩土力学基本理论与数值分析、非线性土动力学理论与计算、海洋土力学理论与实验技术等方面的教学与科学研究工作。E-mail: tianmaolanjd@yahoo.com.cn。

Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading

LUAN Mao-tian[1, 2]，JIN Dan[1, 2]，XU Cheng-shun[3]，ZHANG Qi-yi[1, 2]，ZHANG Zhen-dong[1, 2]

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A set of stress controlled bi-directional cyclic loading tests under isotropic consolidated condition was conducted for simulating the cyclic stress induced by wave loading. The stress path followed during the test in terms of $\sigma_d/2$ and τ was controlled in shape of ellipse. The area bounded by the elliptical stress path was kept unchanged while the amplitude of the axial and torsional shear stresses were varied to study the effect of two components on the strength and deformation behavior of saturated loose sand. It was shown that the resistance to liquefaction of saturated sand was considerably related with both the area of elliptical stress path and the ratio of the two stress components. For the same ratio of two stress components, the resistance to liquefaction of saturated sand decreased with the increasing area of the elliptical stress path. However, for the same area of elliptical stress path, the sand might exhibit the highest resistance to liquefaction at a critical ratio of axial and torsional shear stresses, 0.6~0.75. The resistance to liquefaction increased with the increasing ratio of $\sigma_d/2$ and τ when the ratio was less than the critical value, and decreased with the increasing ratio of $\sigma_d/2$ and τ when the ratio was larger than the critical value. Moreover, the pore water pressure developed gradually to the initial effective confining pressure with transient fluctuation and phase matching axial load.

Key words: saturated loose sand; bi-directional cyclic loading; elliptical stress path; resistance to liquefaction; critical value; pore water pressure

0 引 言

近几十年来，由于世界范围内地震活动的频繁，砂土地基失效造成的结构物的大规模破坏引起了世界各国学者的重视。同时海洋资源的开发以及海洋空间的利用也日益受到国内外的高度重视，然而由于海洋环境的复杂，与陆地情况相比，海洋工程结构与地基在动力响应、变形与破坏方面存在显著的差别。这体

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50579006）；国家自然科学基金重点资助项目（50639010）

收稿日期：2007－07－17

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现在：海洋表面波浪的周期性运动在海床表面产生了往复的波压力[1]，在这种循环波压力作用下，海洋地基或者海床土体内的有效应力场和超静孔隙水压力场都随着时间和空间位置的变化而变化。波浪荷载在海床中产生的正应力偏差（竖向正应力和水平正应力之差）与剪应力及由两者组合而成的总偏差应力都在不断的循环变化。在波浪荷载的一个循环过程中，海床土体的主应力轴发生了连续不断的旋转[2]。与波浪荷载相类似，在公路和铁路的路基中由交通荷载所产生的剪应力也同样以主应力方向旋转为特征[3-4]。

对这种复杂应力条件下的循环剪切特性进行研究方面，Seed 等人通过振动台对干砂进行了多向剪切试验，发现具有两个等值分量的双向振动比单向振动时强度低 10%～20%[5]。Boulanger 等人利用 UCB-2D 简单剪切仪进行了几组不同密度，不同初始静水平剪切荷载的双向振动剪切试验，发现砂土水平向的抗力比垂直向更大，分析其原因为剪切应力的反向情况不同与主应力方向发生了旋转[6]。国内沈瑞福等[7]利用双向振动扭剪仪对砂土进行了常规动扭剪、常规动三轴和动主应力轴连续旋转条件下的不排水剪切试验，指出考虑动主应力轴旋转，土的强度明显降低，可达到 15%。姚仰平等[8]人通过国内首创的振动拉压扭剪三轴仪上对饱和砂土的圆柱试样进行大量的动力试验，揭示了中主应力系数、主应力轴方向连续旋转及剪切胀缩性对土动力特性的重要影响。郭莹等[9]人针对福建标准砂进行了循环扭剪、动三轴、轴向－扭转双向耦合剪切试验，指出动主应力轴连续旋转的轴向－扭转双向耦合剪切试验得到的动强度较前两者都低，与循环扭剪试验得到的动强度相比约降低 10%～30%。循环三轴试验次之，循环扭剪的动强度最高。

在一般的抗震设计或分析中，竖向地震动的影响常不考虑。实际上，不考虑竖向地震动的影响是一种过分的简化，随着国内外数字化强震动台网的建设、地震破坏现象以及地震数据的进一步积累，使得越来越多的学者意识到应该充分重视竖向地震动的作用，仅仅考虑水平向地震动作用是不够的。2001 年我国滦县地震，在近场地震中或发震断层附近记录到较强的竖向地震动，一些场点记录到的竖向地震动峰值超过水平向地震动峰值。近场竖向地震动的这一特征引起了国内外学者的极大关注[10]。周正民等分别对国内外数十次地震的竖向地震动进行了近场加速度峰值比的统计研究，研究结果表明：竖向与水平向加速度峰值比与震源距有关，随着震源距增加，比值降低[11]。

受土工实验技术的限制，对于不等幅双向剪切至今尚缺乏较系统的试验研究，也没有比较一致的认识[12]。

利用大连理工大学开发引进的土工静力－动力液压－三轴扭转多功能剪切仪[13]，针对福建标准砂进行了一系列不等幅双向耦合不排水循环剪切试验。着重探讨均等固结条件下，双向耦合剪切试验中两个荷载分量的变化对砂土液化强度的影响，即竖向荷载分量与扭转向剪切荷载分量，分别记为 σ_d 与 τ。

1　试验土料及实验方法

1.1　试验土料

试验中采用福建标准砂，相对密度控制为 D_r =30%。通过测定，该砂土的比重 G_s =2.643；颗粒尺寸 d_{50} =0.34 mm；不均匀系数 C_u =1.542；最大孔隙比 e_{max} =0.774，最小孔隙比 e_{min} =0.537；最大干密度 ρ_{max} = 1.72 g·cm^{-3}，最小干密度 ρ_{min} =1.49 g·cm^{-3}。

试验均采用分层干装法制备砂样，并联合利用通 CO_2、通无气水与施加反压三种方法来进行试样的饱和，制备砂样的孔隙水压力系数均达到 98%。统一地采用一种固结路径，即在不排水条件下同时施加内外侧压至设计平均固结压力 p'_c =100 kPa，然后上下同时排水，固结约 30 min 至变形稳定。试验中采用的双出力传感器可以实现竖向荷载与扭拒的同时施加。循环荷载的振动频率采用 0.1 Hz，且循环荷载施加过程中总的球应力保持不变。

1.2　试样尺寸及应力状态

如图 1 所示，试验中均采用空心圆柱试样，试样外径和内径分别为 100 mm 和 60 mm，试样高 150 mm。在试验中，通过独立控制竖向荷载 W、扭矩 M_T，从而在试样中实现各种不同的动力组合应力条件。

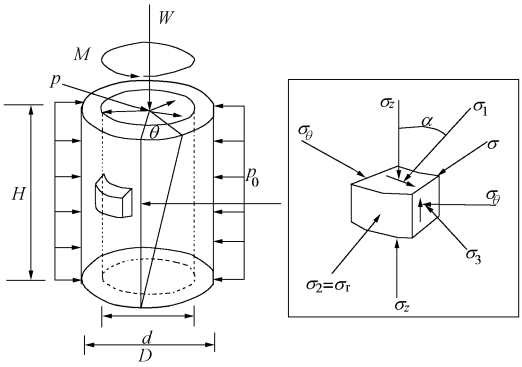


图 1　空心圆柱试样中土的应力状态

Fig. 1 Stress state of soil element in hollow-cylindric soil sample

1.3　试验设计思路

为模拟波浪与地震荷载的作用，在竖向－扭转耦合剪切试验中控制扭矩与竖向荷载的相位差为 90°（如图 2 所示），分别控制轴向荷载和扭转向剪切荷载的幅值，使 $\sigma_d/2$ 与 τ 应力空间内的应力路径为椭圆，实现主应力轴连续旋转的应力变化模式。为了分别探讨相互垂直的两个剪切荷载分量的变化对砂土动剪切特性的影响，定义轴向动应力幅值与动剪应力幅值的比值 $(\sigma_d/2)/\tau=\lambda$。为了探讨椭圆面积大小对砂土液化强度的影响，取与椭圆面积相等的圆的半径

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$\sigma^* = \sqrt{(\sigma_d/2)\times\tau}$ 作为度量来反映椭圆面积的大小。试验以下列两种思路进行：

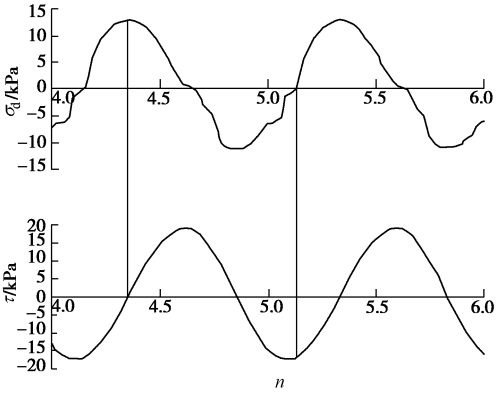


图 2 两个相互垂直的荷载分量

Fig. 2 Stress components recorded in the test

（1）针对三组不同的椭圆面积，分别实现了至少 4 种不同比值 λ 的椭圆应力路经。每组试验均保证 $\sigma_d/2$ 与 τ 应力空间内的椭圆应力路径面积不变，即 σ^* 不变，变化两个荷载分量的幅值，从类似循环三轴逐渐变化到类似循环扭剪的荷载模式，如图 3 所示。模拟从近场地震到远场地震，竖向与水平向加速度峰值之比逐渐减小的情况，其中图 3（a）所示类似循环三轴的荷载模式中，竖向荷载大于剪切荷载，类似近场地震条件。

（2）针对 5 组不同的 λ 值，分别进行了至少两种不同椭圆面积的试验。每组试验均保证 λ 值不变，变化椭圆应力路径的面积。

图 4 给出了试验实测的两种应力路径，分别为轴向应力与剪应力之比大于 1 及小于 1 的情况。如图所示，试验效果良好，能实现主应力方向的连续旋转，及双向剪切荷载分量的大小变化。

2 试验结果分析

2.1 初始液化的定义

在循环剪切作用下，有体积收缩趋势的饱和砂土在不排水剪切条件下受到体积约束，这种体积收缩的趋势会以孔隙水压力增长的方式表现出来。图 5 为试验过程中实测的孔隙水压力变化曲线。在循环荷载作用下，孔隙水压力在瞬时波动变化的同时呈现出逐渐累积上升的发展趋势。对于任何应力路径，孔隙水压力均发展至达到初始有效围压。Seed 等把不排水剪切试验中有效应力第一次为零的状态称为初始液化[14]。取砂土达到初始液化时的振动次数为破坏振次 N_f 。

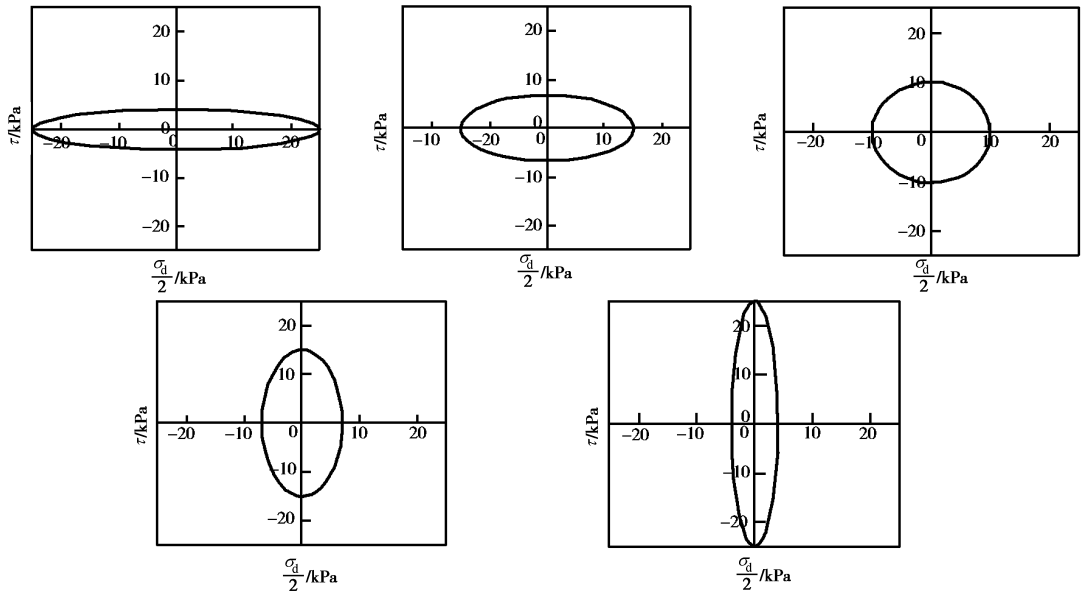


图 3 均等固结条件下双向耦合试验的应力路径

Fig. 3 Stress paths in bi-directional cyclic shearing under isotropic consolidation

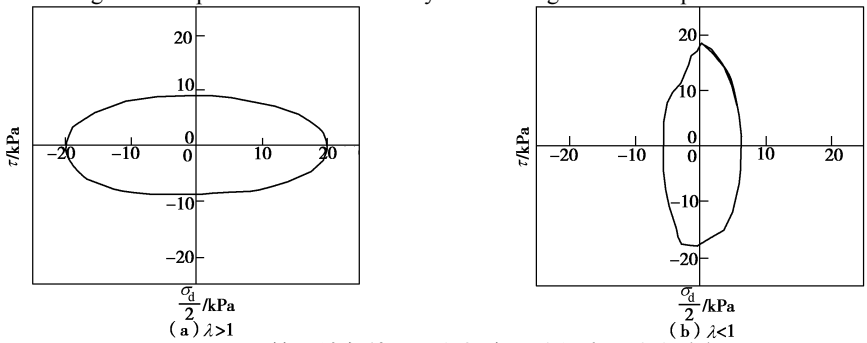


图 4 均等固结条件下双向耦合试验的实测应力路径

Fig. 4 Stress paths recorded in vertical-torsional coupling shear tests under isotropic consolidation

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

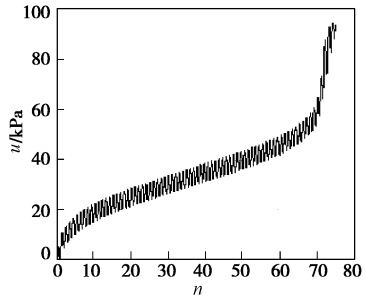


图 5 试验实测的孔隙水压力时程曲线

Fig. 5 Pore pressure recorded in bi-directional cyclic loading

2.2 强度

不同椭圆面积，不同荷载分量组合情况下砂土液化强度与破坏振次的试验结果如图 6，7 所示。

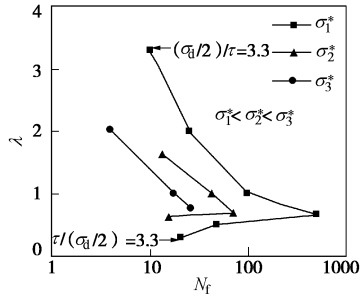


图 6 不同椭圆面积下荷载分量之比与破坏振次的关系

Fig. 6 Relationship between λ and N_f

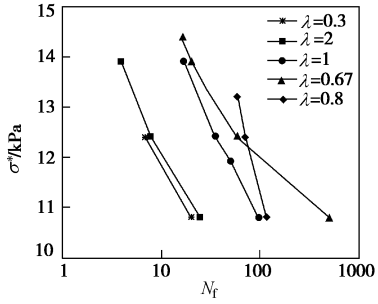


图 7 椭圆面积大小与振次的关系

Fig. 7 Relationship between σ^* and N_f

如图所示，在不同的双向椭圆耦合循环剪切作用下，砂土的强度表现出显著的差异。砂土的强度与椭圆的面积及两个荷载分量幅值之比 λ 密切相关。由图 6 可以看出，强度曲线在 λ=0.6～0.75 时出现了临界点，当 λ 的值大于此临界点时，达到初始液化所需要的振次随 λ 的减小而增多；当 λ 的值小于此临界点时，达到初始液化所需要的振次随 λ 的增大而增多。另外，试验结果还表明，当 λ 大于临界值时，对于具有相同比值的 $(\sigma_d/2)/\tau$ 与 $\tau/(\sigma_d/2)$ 的不同试验，后者的强度更高，如图 6。说明类似循环扭剪条件下得到的土的动强度比类似循环三轴条件下得到的动强度高，与郭莹等得到的双向耦合剪切试验得到的动强度最低，循环三轴试验次之，循环扭剪的动强度最高结果一致。

由图 7 可以看出，在两个荷载分量幅值之比 λ 相同时，砂土液化所需振次随椭圆面积增大而减少。且临界值随着椭圆面积增大而逐渐缓慢增大。

结果表明，判断砂土在双向耦合剪切作用下的液化动强度，必须综合考虑外加荷载椭圆应力路径的面积大小以及和两个相互垂直荷载分量的幅值之比。

2.3 循环应力应变关系

试验结果显示，在均等固结条件下轴向应变与剪应变均呈现显著的循环效应与累积效应。然而如图 8 和 9 所示，尽管轴向与剪切向正反两个方向的循环应力对称，但是其正反方向的应变却并不对称，轴向应变以拉伸向的累积变形更大。

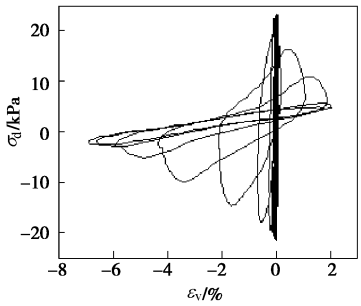


图 8 试验实测的轴向应力－应变关系

Fig. 8 Relationship between axial stress and axial strain

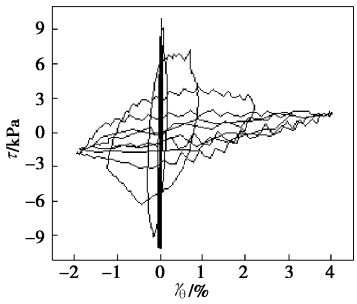


图 9 试验实测的剪应力－应变关系

Fig. 9 Relationship between shear stress and shear strain

2.4 孔隙水压力

在循环荷载作用下孔隙水压力在瞬时波动变化的同时呈现出逐渐累积上升的发展趋势。对于任何应力路径，孔隙水压力均发展直至发生初始液化，如图 10。

对于任何 λ 值，在一个周期内，孔隙水压力的循环变化与轴向应力相位一致，与循环剪应力相位相差 90°，如图 8，9 所示。

3 结　论

（1）双向椭圆耦合剪切作用下，砂土液化强度与椭圆应力路径的面积和轴向动应力与剪应力幅值的比值密切相关。

（2）对于任何加载路径面积，当加载路径面积保持不变时，砂土在竖向与扭转向荷载分量的比值达到某一临界值 0.6～0.75 时表现出最高的强度，且对于具有相同比值的 $(\sigma_d/2)/\tau$ 与 $\tau/(\sigma_d/2)$ 的不同应力路径，后者的液化强度更高。

（3）对于相同的 λ 值，砂土的液化强度随椭圆应力路径的面积增大而减小。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

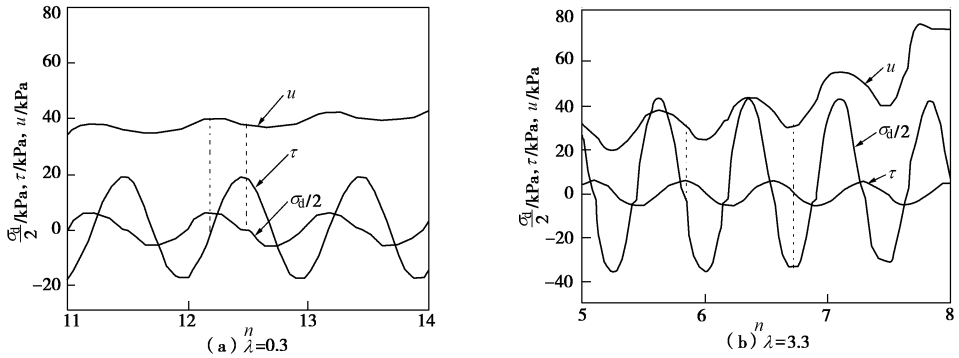


图 10 u， $\sigma_d/2$， τ 随振次变化趋势

Fig. 10 u, $\sigma_d/2$ and τ recorded in cyclic loading

（4）对于任何 λ 值，在一个周期内孔隙水压力的循环变化与轴向应力相位一致，与循环剪应力相位相差 90°。

参考文献：

[1] MADSEN O S. Wave-induced pore-pressure and effective stresses in a porous bed[J]. Geotechnique, 1978, **28**(4): 435－440.

[2] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads[J]. Soils and Foundations, 1983, **23**(4): 11－26.

[3] 许成顺. 复杂应力条件下饱和松砂剪切特性及本构模型的试验验证[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (XU Cheng-shun. Experimental study on behavior of saturated loose sands under complex shear loading and constitutive model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))

[4] 何 杨. 复杂应力条件下饱和砂土孔隙水压力及体变特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (HE Yang. Experimental study on pore water pressure and volumetric strain characteristics of saturated sands under complex stress condition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))

[5] SEED H B, PYKE R M, MARTIN G R. Effect of multi-directional shaking on liquefaction of sands[R]. Berkeley: University of California, 1975.

[6] BOULANGER R W, SEED R B. Liquefaction of sand under bi-directional monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, **121**(12): 870－878.

[7] 沈瑞福, 王洪瑾, 周克骥, 周景星. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 70－78. (SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Ke-ji, ZHOU Jing-xing. Building-up of pore water pressure under cyclic rotation of principal stress and evaluation of stability of seabed deposit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 70－78. (in Chinese))

[8] 姚仰平. 真三轴应力条件下砂土的非线性动力本构关系的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 1995. (YAO Yang-ping. Nonlinear dynamic constitutive relation of sand under real triaxial stress condition[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 1995. (in chinese))

[9] 郭 莹. 复杂应力条件下饱和松砂的不排水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003. (GUO Ying. Experimental studies on undrained cyclic behavior of loose sands under complex stress conditions considering static and cyclic coupling effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese))

[10] 林 淋. 竖向地震动特征分析[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2005. (LIN Lin. Characteristics analysis of vertical ground motion[D]. Beijing: China Seismological Bureau, 2005. (in Chinese))

[11] 周正华, 周雍年, 卢 涛, 杨 程. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(3): 25－29. (ZHOU Zheng-hua, ZHOU Yong-nian, LU Tao, YANG Cheng. Study on characteristics of vertical ground motion[J]. Chinese Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, **23**(3): 25－29. (in Chinese))

[12] BOULANGER R W, CHAN C K, SEED H B, SEED R B. A low-compliance bi-directional cyclic simple shear apparatus[J]. Geotech Testing J, 1993, **16**(1): 36－45.

[13] 栾茂田, 郭 莹, 李木国, 等. 土工静力－动力液压三轴－扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(5): 670－675. (LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, **43**(5): 670－675. (in chinese))

[14] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1966, **92**(SM6): 105－134.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net