

DOI: 10.11779/CJGE201412024

双向耦合剪切条件下饱和砂土动强度特性试验研究

许成顺¹, 高英^{1,2}, 杜修力¹, 耿琳¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 山东协和学院建筑工程学院, 山东 济南 250109)

摘要: 针对饱和粉细砂, 利用双向耦合多功能剪切仪进行了均等固结条件下的循环耦合剪切试验。应用已有的动强度定义, 着重研究了双向动荷载的相位差 β , 双向动荷载的幅值比值 λ 对砂土动强度及孔压特性的影响。实验结果表明, 砂土液化动强度与相位差 β 及幅值之比 λ 密切相关, 现有的动强度定义在复杂加载情况下具有一定局限性; 双向动荷载相位差 β 以及幅值比值 λ 对孔隙水压力增长速度影响显著, 但对归一化孔隙水压力发展模式没有显著的影响。

关键词: 主应力轴连续旋转; 相位差; 均等固结; 孔隙水压力; 动强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)12-2335-06

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。

Dynamic strength of saturated sand under bi-directional cyclic loading

XU Cheng-shun¹, GAO Ying^{1,2}, DU Xiu-li¹, GENG Lin¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Architectural Engineering Institute of Shandong Xiehe University, Jinan 250109, China)

Abstract: Using the vertical-torsional coupling shear apparatus, a set of bi-directional cyclic loading tests on saturated sand under isotropic consolidated condition are conducted. Based on the existing definitions of dynamic strength, the effects of phase difference of bi-directional dynamic load (β) and ratio of bi-directional dynamic load amplitude (λ) on dynamic strength and pore pressure of sand are studied. The test results show that the dynamic strength of liquefaction of saturated sand considerably relates with both β and λ . The existing definitions of dynamic strength have obvious limitation. The phase difference of bi-directional dynamic load (β) and the ratio of bi-directional dynamic load amplitude (λ) have significant influences on the growth rate of pore water pressure, while they have no significant influence on the development model for the normalized pore water pressure.

Key words: continuous rotation of principal stress axis; phase difference; isotropic consolidated condition; pore water pressure; dynamic strength

0 引言

随着海洋能源的不断开发与利用, 海底管线、防波堤、采油平台等许多大型海洋结构物不断修造, 研究风浪或地震等复杂振动或循环荷载作用下海洋土体的动力特性是海洋建筑物地基动力响应及稳定性分析的重要基础。实际上波浪荷载、地震作用及交通荷载都有共同的作用效应, 即应同时考虑竖向与剪切向双向力的耦合作用影响。

关于竖向和剪切向动荷载的耦合作用, 以往主要针对波浪荷载作用下的海床土体反应开展了诸多实验研究, 重点围绕主应力轴连续旋转效应的影响等。例如 Ishihara 等^[1-2]、Towhata 等^[3]采用空心扭剪仪对松砂试样进行了静态连续主应力轴旋转试验, 试验结果表明, 在不排水条件下纯主应力轴旋转将导致松砂正的

孔压积累, 最终导致松砂液化。王平安等^[4]将风浪荷载等效为无限延伸的简谐波, 把海床土体简化为半无限弹性体, 得出饱和土体中主应力轴的旋转可导致土的动强度约降低 20%; 郭莹等^[5-6]、栾茂田等^[7-8]、许成顺等^[9-11]利用静动扭剪多功能剪切仪进行了扭转和竖向循环耦合剪切试验和循环扭剪试验, 通过对比三向非均等固结条件下的两类试验结果, 研究了初始主应力方向变化和振动过程中主应力方向变化对松砂动强度特性的影响。

但以往的研究主要针对波浪荷载, 将波浪荷载简

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB013600); 国家自然科学基金项目(51278015); 北京市教委重点项目(KZ201210005010); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)

收稿日期: 2014-01-06

化为等幅值无限延伸的简谐波，将海床土体简化为半无限空间弹性介质，因此，模拟土体单元受力时，控制剪应力幅值和轴向偏差应力幅值（之半）相等^[12]，相位相差 90°，即利用竖向偏差应力保持不变，主应力轴连续旋转来模拟波浪荷载作用下的土体单元的受力情况，如图 1 所示。

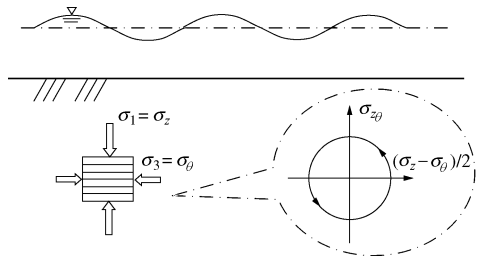


图 1 波浪荷载作用下海床土体中的动主应力轴连续旋转

Fig. 1 Rotation of cyclic principal stress axes under wave loading

而实际上，海床土体并非是理想的半无限空间中的弹性介质，加之考虑地震和波浪共同作用下的海床土体动力响应（973 计划项目——地震、波浪和海流等共同作用下多个质体动力相互作用），用竖向偏差应力保持不变，主应力轴连续旋转来模拟土体单元受力情况具有一定的局限性。实际上，对于室内单元体试验，研究土体单元的复杂受力状态，可考虑竖向动应力和动剪应力以不同的比值和不同的相位差左右下试样上，如图 2 所示。

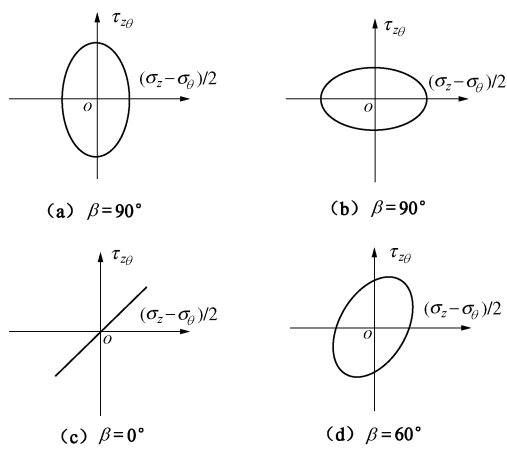


图 2 不同相位差、不同应力幅值耦合时的加载路径

Fig. 2 Loading paths under different phase differences and stress amplitudes

针对上述问题，本文利用双向耦合多功能剪切仪^[13]，通过改变双向动荷载幅值和初始相位差，来更真实的模拟探讨地震、波浪共同作用下引起海床土体主应力轴连续旋转下土体的动力特性。

1 试验土料及试验方法

1.1 试验土料与试样制备

本试验采用细砂，比重 $G_s=2.66$ ，试样装样密度 $\rho_d=1.46\text{ g/cm}^3$ ；孔隙比 $e=0.82$ 。其土样的颗粒级配： $>2\text{ mm}$ 为 0.2%， $2.0\sim0.5\text{ mm}$ 为 2.8%， $0.5\sim0.25\text{ mm}$ 为 20.6%， $0.25\sim0.075\text{ mm}$ 为 72.8%， $<0.075\text{ mm}$ 为 3.6%。

本试验采用空心试样，尺寸为内径 60 mm，外径 100 mm，高度 150 mm。采用分层干装的方法制备成样，然后依次通入 CO_2 和无气水，再施加 200 kPa 的反压联合对试样进行饱和，保证制备的所有砂样的孔压系数 B 均达到 96% 以上。关于试验设备已在文献中详细介绍^[13]，土体单元的受力状态如图 3 所示。

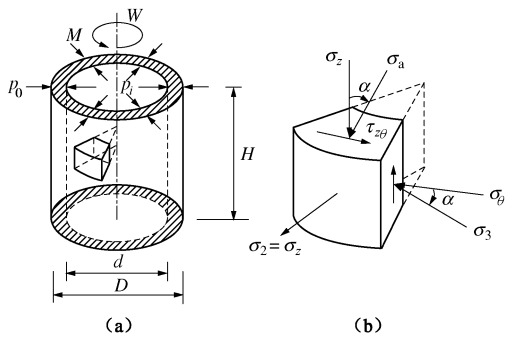


图 3 空心圆柱试样的应力状态

Fig. 3 Stress state of hollow cylindrical soil sample

1.2 试验设计思路

目前关于轴向和扭转向荷载共同作用下的动强度，有两种典型的定义^[14-15]，即

$$\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2) \cdot \tau_d} \quad (1)$$

$$\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2)^2 + \tau_d^2} \quad (2)$$

式中， $\sigma_d/2$ ， τ_d 即图 2、3 中的 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ ， $\tau_{z\theta}$ ，这两种定义能够很好地反映两个方向作用力的耦合影响，但是不能反映竖向偏差应力幅值与剪应力幅值所占的比例和两者的相位差。本文定义竖向偏差应力幅值与剪应力幅值的比值为 $\lambda = \frac{\sigma_d}{2\tau_d}$ ，剪应力与竖向偏差应力的相位差为 β 。

为了探讨不同动应力幅值的比值和相位差对动强度的影响，本文开展了一系列试验，所有试样均在 $\sigma_3=100\text{ kPa}$ 的压力下完成均等固结，再施加轴向动荷载和扭转向动荷载，具体试验设计思路：①试验方案一， $\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2) \cdot \tau_d} = \sqrt{130}\text{ kPa}$ ， $\beta=0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ， $\lambda=2.40, 1.80, 1.15, 0.65, 0.35$ ；②试验方案二， $\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2)^2 + \tau_d^2} = \sqrt{130}\text{ kPa}$ ， $\beta=0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ， $\lambda=2.55, 1.80, 1.15, 0.55, 0.35$ 。

2 试验结果分析

图 4 表示相位差分别为 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时的实

测加载路径和理想应力路径对比, 可见本试验实际加载效果良好, 完全能够实现试验目的。

且由图 4 可看到, 当相位差 β 为 0° 时, 主应力方向发生突变, 当相位差 β 为 60° , 90° 时主应力轴发生连续旋转。

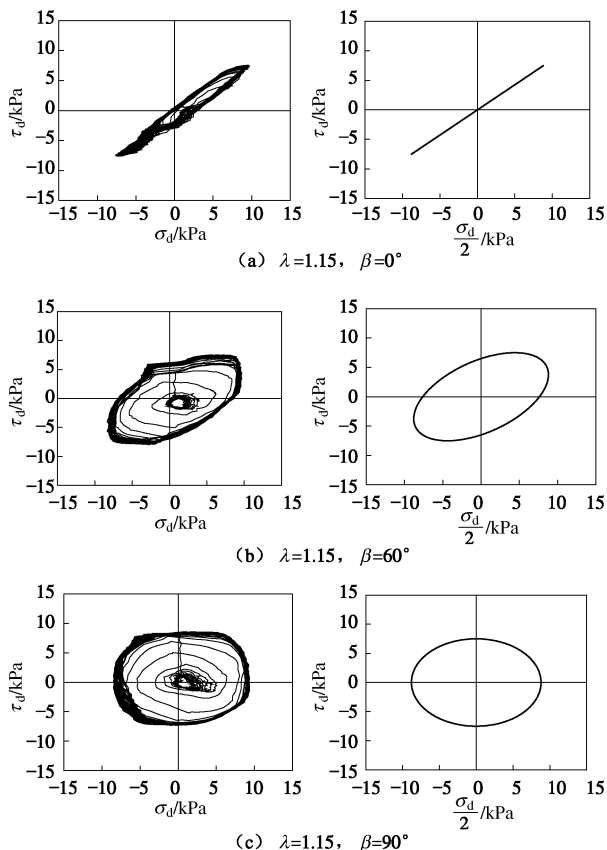


图 4 轴向-扭转双向耦合试验的理想与实测应力路径

Fig. 4 Ideal and measured stress paths of bi-directional shear loading tests in isotropic consolidation

图 5 表示孔隙水压力时程曲线, 可见均等固结条件下, 在一定的动荷载作用下土体发生了完全液化, 本文所有试验均将孔隙水压力达到平均围压时的状态作为破坏或液化标准。

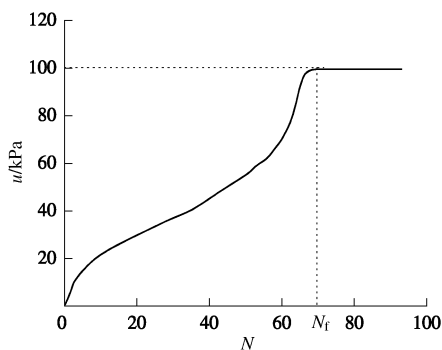


图 5 孔隙水压力时程曲线

Fig. 5 Time histories of pore water pressure

2.1 λ 和 β 对动强度的影响

图 6 给出了按试验方案一所得到的动强度曲线,

即控制动强度为 $\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2) \cdot \tau_d} = \sqrt{130} \text{ kPa}$, 相位差 β 分别为 0° , 60° , 90° 时, 轴向动应力幅值与动剪应力幅值之比 λ 与破坏振次 N_f 变化规律。

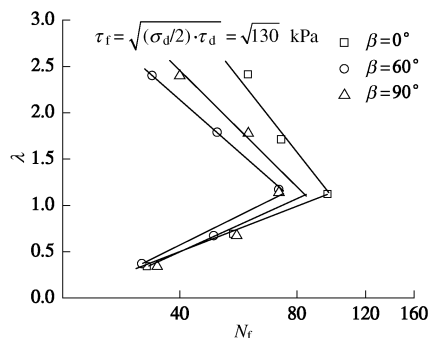


图 6 λ 与 β 对动强度的影响

Fig. 6 Influences of λ and β on dynamic strength

由图 6 可见, 相位差 β 及动应力幅值之比 λ 对破坏振次影响显著。对于特定的相位差, 破坏振次与动应力幅值之比 λ 密切相关, 当 $\lambda = 1.0$ 左右时, 相同的动强度 τ_f 水平下, 液化所需振次最高, 即动强度最高。以 $\lambda = 1.0$ 左右为转折点, 随着 λ 增大或减小, 土体的动强度逐渐降低, 且在不同的相位差下呈现出相同的规律。同时, 这与栾茂田等^[7]研究的相位差为 90° 时的试验中得出的结论一致。

同时, 轴向动荷载和扭转动荷载的相位差随 λ 的变化对强度也具有一定的影响, 当 $\lambda > 0.60$ 左右时, 相位差对动强度具有显著的影响, 即相位差为 60° 或 90° 时与 0° 的情况相比动强度明显降低, 即主应力轴连续旋转导致强度降低。当 $\lambda < 0.60$ 左右时, 相位差对动强度的影响并不显著。这是由于按照动强度的第一种定义, 当 λ 小于或大于某一值时, 轴向动荷载或扭转动荷载中某一量所占分量明显大, 另一分量非常小, 因此两者的相位差并不影响液化特性。对于本文试验, $\lambda < 0.60$ 左右时, 相位差已不产生明显的影响, 为了证实这一结论, 本文增加了试验三: $\lambda = 0.60$, $\beta = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, $\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2) \cdot \tau_d} = 10.4, 8.4, 6.5, 5.5$ 。

图 7 给出了相同的动应力幅值比值 $\lambda = 0.60$ 的情况下, 相位差对动强度的影响。由图可见相位差 β 对动强度没有显著的影响, 即 λ 小于某一值后, 动强度与动荷载的相位差无关, 在本文试验中 λ 值为 0.60 左右。

图 8 给出了试验方案二所得到的动强度曲线, 即控制动强度为 $\tau_f = \sqrt{(\sigma_d/2)^2 \cdot \tau_d^2} = \sqrt{130} \text{ kPa}$, 相位差 β 分别为 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时, 轴向动应力幅值与动剪应力幅值之比 λ 与破坏振次 N_f 的变化规律。

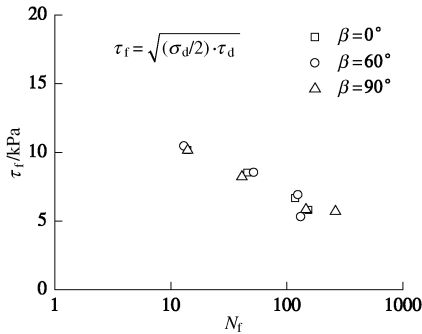


图 7 相位差 β 对动强度的影响

Fig. 7 Influences of phase difference β on dynamic strength

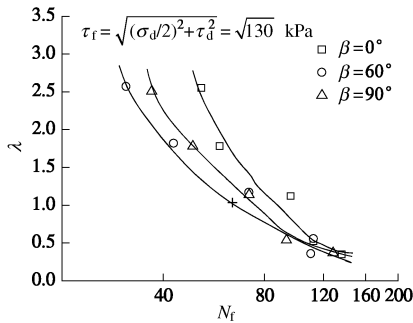


图 8 λ 与 β 对动强度的影响

Fig. 8 Influences of λ and φ on dynamic strength

由图 7、8 可见，相位差 β 及动应力幅值之比 λ 对破坏振次有显著影响，其影响规律与实验方案一所得规律有所区别，即没有转折点。对于特定的相位差，随 λ 减小，土体液化所需的破坏振次越来越大，也即动强度越来越高。这是因为按照动强度的第二种定义， λ 越小，扭转动荷载所占分量越大，试验越接近循环扭剪试验，而已有的试验研究表明：在均等固结条件下，循环扭剪动强度最高，循环三轴试验次之，循环剪应力幅值不变的圆形耦合剪切试验的动强度最低。对于特定的 λ ，随 λ 的增大相位差对动强度的影响越来越显著，当 λ 大于 0.60 左右时，相位差对动强度具有显著的影响，即相位差为 60° 或 90° 时与 0° 的情况相比动强度明显降低，即主应力轴连续旋转导致强度降低，当 λ 小于 0.60 左右时，相位差对动强度的影响不再显著。为了证实这一结论，本文增加了试验四： $\lambda=0.60$ ， $\beta=0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ， $\tau_f=\sqrt{(\sigma_d/2)^2+\tau_d^2}=15.8, 12.8, 10, 8.4$ 。

图 9 给出了相同的动应力幅值比值 $\lambda=0.60$ 的情况下，相位差对动强度的影响。由图可见相位差对动强度没有显著的影响，即 λ 小于某一值后，动强度与动荷载的相位差无关，在本文试验中 λ 值为 0.60 左右。

2.2 λ 和 β 对孔隙水压力的影响

在循环荷载作用下孔隙水压力的发展是影响饱和砂土变形与强度特性的根本原因。关于影响土动孔隙水压力增长的主要因素，有学者通过分析整理各种类

型的循环剪切试验的大量试验数据，获得了复杂应力条件下统一的动孔隙水压力的增长模式。不同类型的循环试验所达到的最大孔隙水压力差别较大，孔压模型也有所区别。

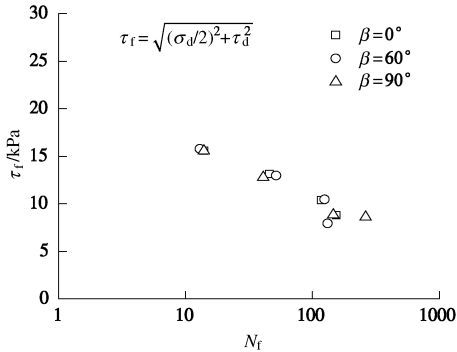


图 9 相位差 β 对动强度的影响

Fig. 9 Influences of β on dynamic strength

图 10、11 分别给出了试验方案一、试验方案二所得到的孔隙水压力时程曲线和归一化的孔隙水压力发展模式，即控制 $\tau_f=\sqrt{(\sigma_d/2)\cdot\tau_d}=\sqrt{130}$ kPa (图 10) 或 $\tau_f=\sqrt{(\sigma_d/2)^2+\tau_d^2}=\sqrt{130}$ kPa (图 11)。由图 10、11 可见，相位差相同的情况下，动荷载幅值的比值 λ 对孔隙水压力增长速度影响显著，但同一相位差下，归一化后的孔隙水压力发展模式具有很好的一致性。

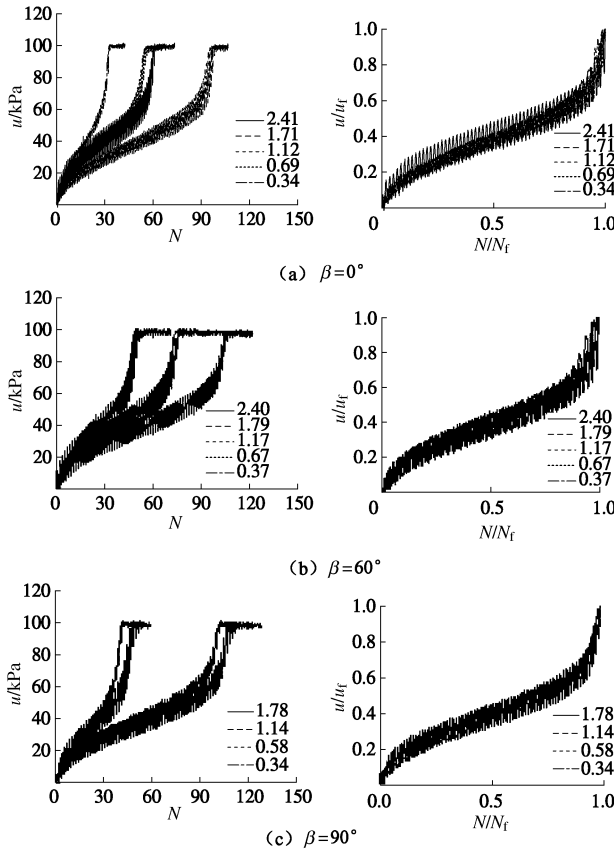


图 10 孔隙水压力时程曲线与归一化孔隙水压力发展模式
Fig. 10 Time histories of pore water pressure and development model for normalized pore water pressure

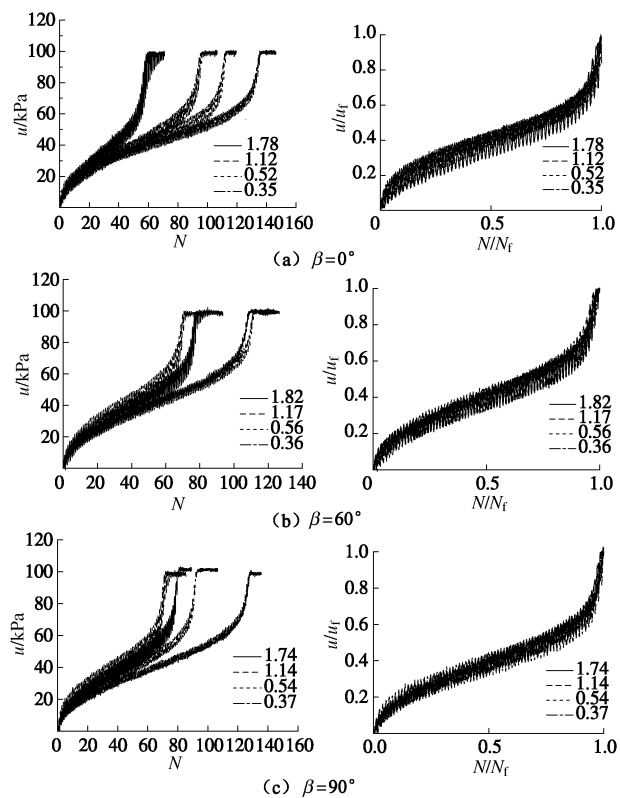


图 11 孔隙水压力时程曲线与归一化孔隙水压力发展模式
Fig. 11 Time histories of pore water pressure and development model for normalized pore water pressure

图 12 给出了不同相位差时的归一化孔隙水压力发展模式, 可见归一化的孔隙水压力发展模式与相位差也没有显著的依赖关系。

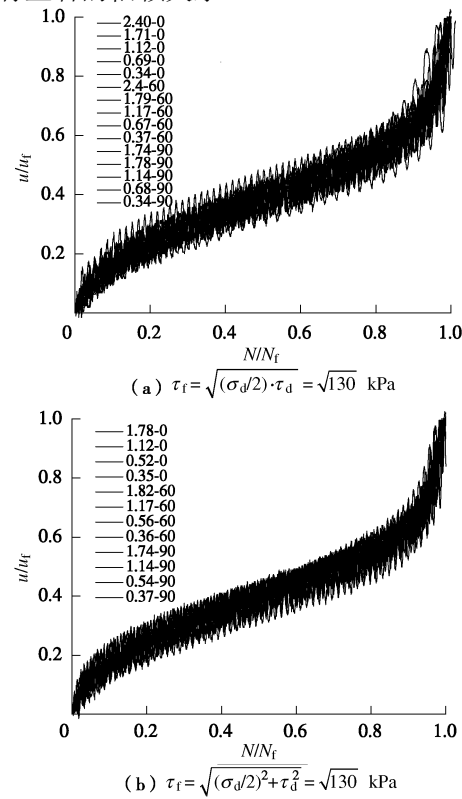


图 12 归一化孔隙水压力发展模式
Fig. 12 Development model for normalized pore water pressure

3 结 论

本文利用双向耦合多功能剪切仪进行了均等固结条件下的循环耦合剪切试验。应用已有的动强度定义, 着重研究了双向动荷载的相位差和双向动荷载的幅值比值对砂土动强度及孔隙水压力等液化特性的影响, 得到了以下 3 点结论。

(1)关于轴向动荷载和扭转动荷载共同作用下的动强度定义, 现有的两种定义具有一定的局限性。试验结果表明, 土体的动强度与轴向动荷载和扭转动荷载幅值的比值以及两个荷载的相位差具有显著的依赖关系。因此, 当需要同时考虑轴向荷载和扭转荷载的工况时, 应综合考虑两者的比值以及相位差的影响。

(2)当两种动荷载幅值的比值 λ 小于某一值时, 相位差对动强度的影响可忽略不计, 对于本文试验条件, 其 λ 值为 0.60。

(3)轴向动荷载和扭转动荷载的比值以及相位差对孔隙水压力的增长速度影响显著, 但对归一化的孔隙水压力发展模式没有显著的影响。

致 谢: 本文试验同时得到了长江学者和创新团队发展计划项目的支持, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] ISHIHARA K, YAMAZAKI F. Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading[J]. Soils and Foundations, 1980, **20**(1): 45 - 59.
- [2] ISHIHARA K, A YAMAZAKI. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. Soils and Foundations, 1984, **24**(3): 85 - 100.
- [3] TOWHATA K, ISHIHARA K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes[J]. Soil and Foundations, 1985, **25**(2): 135 - 147.
- [4] 王平安, 于 澍. 主应力轴旋转下饱和砂土振动孔隙水压力发展和变化的研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996, **28**(4): 81 - 85. (WANG Ping-an, YU Shu. On the pore water pressure in saturation sand subjected to rotation of principal stress axes[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1996, **28**(4): 81 - 85. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 栾茂田, 许成顺, 何杨, 等. 复杂应力条件下饱和松砂单调与循环剪切特性的比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006(1): 181 - 187. (LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, HE Yang, et al. A comparative study on monotonic and cyclic shear behavior of saturated loose sand under complex stress condition[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006(1): 181 - 187. (in Chinese))
- [9] 许成顺, 栾茂田, 何杨, 等. 主应力方向对饱和松砂不排水单调剪切特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1085 - 1089. (XU Cheng-shun, LUAN Mao-tian, HE Yang, et al. Experimental study on effect of orientation of the principal stress on undrained behavior of saturated loose sand under monotonic shearing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1085 - 1089. (in Chinese))
- [10] 许成顺, 文利明, 杜修力, 等. 不同应力路径条件下的砂土剪切特性试验研究[J]. 水利学报, 2010(1): 108 - 112. (XU Cheng-shun, WENG Li-ming, DU Xiu-li, et al. Experimental study on shear behaviors of sand under different stress path[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010(1): 108 - 112. (in Chinese))
- [11] 冷艺, 栾茂田, 许成顺, 等. 复杂应力条件下饱和砂土单调剪切特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 21 - 28. (LENG Yi, LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, et al. Experimental research on behaviors of saturated sand subject to drained shear strength under complex stress conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 21 - 28. (in Chinese))
- [12] 沈瑞福, 王洪瑾, 周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996(1): 27 - 33. (SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Dynamic strength of sand under the rotation of principal stress axes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(1): 27 - 33. (in Chinese))
- [13] 许成顺, 刘晨, 刘海强, 等. 竖向-扭转双向耦合剪切仪功能分析及应用[J]. 北京工业大学学报, 2013(2): 233 - 238. (XU Cheng-shun, LIU Chen, LIU Hai-qiang, et al. The function analysis and application of vertical-torsional coupling shear apparatus[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013(2): 233 - 238. (in Chinese))
- [14] 聂影, 栾茂田, 杨庆, 等. 不同应力路径下饱和黏土耦合循环剪切特性[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 1927 - 1932. (NIE Ying, LUAN Mao-tian, YANG Qing, et al. Study of coupling cyclic test of saturated clay under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 1927 - 1932. (in Chinese))
- [15] SATO K, YASAHARA K, YOSHIDA N. Effect of drainage with pre-shearing on undrained cyclic shear behavior of dense sand[C]// Proceeding of the 8th International Conference on the Behavior of Off-Shore Structure, 1997: 85 - 97.