

# 单、双向振动条件下饱和粉砂变形特性对比试验研究<sup>①</sup>

刘 潇<sup>1</sup>, 张 学<sup>1</sup>, 赵俭斌<sup>1</sup>, 侯世伟<sup>1</sup>, 郝 哲<sup>2</sup>

(1.沈阳建筑大学, 辽宁 沈阳 110168; 2.辽宁有色勘察研究院, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:**由于仪器水平的限制,关于土体的动力特性的研究目前多采用单向激振方式替代双向激振方式。而这两种激振方式在试验原理方面存在明显不同。很多研究表明,应力路径对土的响应有着不可忽视的影响,这两种方式相替代的合理性尚待证明。本文利用 DSC2000 多功能动三轴试验系统,选取尾矿砂分别在单向及双向振动条件下进行一系列饱和土的动力特性试验,对比两种激振方式作用下土体的滞回曲线以及骨干曲线的差异,分析土体在这两种振动方式下产生差异的原因,并应用双曲线模型对骨干曲线进行拟合,最后给出在进行土体变形特性试验时以单向激振方式替代双向激振方式的适用条件。

**关键词:**单、双向激振; 饱和尾粉砂; 变形特性; 双曲线模型

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0748-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0748

## Study on Deformation Characteristics of Saturated Silty Sand in Uni- and Bidirectional Cyclic Triaxial Tests

LIU Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Xue<sup>1</sup>, ZHAO Jian-bin<sup>1</sup>, HOU Shi-wei<sup>1</sup>, HAO Zhe<sup>2</sup>

(1. Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. Liaoning Nonferrous Geological Exploration and Research Institute, Shenyang 110013, Liaoning, China)

**Abstract:** When evaluating the dynamic characteristics of sandy deposits during earthquakes, the analysis method proposed by Seed is the one almost always adopted. In addition, a unidirectional dynamic cyclic triaxial test rather than a bidirectional one is often used by researchers to determine the dynamic characteristics of sandy deposits. The validity of these methods is called into question considering that the dynamic stress paths induced by uni- and bidirectional cyclic triaxial tests are not the same. In this study, a dynamic triaxial apparatus, capable of vertical and radial dynamic loading, was used to compare uni- and bidirectional cyclic triaxial tests on saturated silty sand. Comparison of the results showed differences in both the hysteresis loops and skeleton curves produced by each method; both deformation and energy dissipation were larger in the unidirectional test; this was found to be a result of spherical stress. A hyperbolic model that perfectly matched the skeleton curves for both sets of test results was then established. Finally, cell pressure was identified as the key factor affecting the test conditions, resulting in the difference between the two methods. A suggested initial cell pressure value is established and given for the tested material.

**Key words:** uni- and bidirectional excitation; saturated tailing silty sand; deformation

① 收稿日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51308355); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2014058); 辽宁省教育厅一般基金项目(L2014232)

作者简介: 刘 潇, 男, 副教授, 主要从事动三轴试验研究。E-mail: 1334290512@qq.com。

characteristic; hyperbolic model

## 0 引言

上世纪六十年代,Seed 提出地震波作用可简化为在垂直向应力保持不变条件下向土体施加规则的往复水平剪应力作用<sup>[1-3]</sup>。这种应力状态可以采用双向激振三轴仪在轴向与径向施加相同频率、幅值和一定相位差的往复荷载来模拟。为方便起见,在实际应用中常采用单向(轴向)振动代替双向振动模拟地震作用,而这种作用的差异对土体在动力作用下变形特性的影响直接决定采用单向动三轴代替双向动三轴试验模拟地震力的合理性和可行性。因此开展单、双向振动三轴试验对比分析是十分必要的。国内外的学者<sup>[4-10]</sup>曾针对此问题展开研究。

Seed 认为,以单向振动三轴试验替代双向振动三轴试验模拟地震作用时的两个前提条件为:球应力循环作用不会产生试样累积孔压和变形,以及球应力与单向振动耦合作用下土体的响应可以线性叠加。陈玉敏等<sup>[6]</sup>在对比单、双向振动条件下萧山软黏土变形特性后认为,双向循环荷载作用下的最小极限循环强度值可以用单向循环荷载作用下的结果代替。黄博等<sup>[7]</sup>在进行了一系列单、双向振动条件下的动力特性试验后认为,试样在较大振次下破坏时,单、双向振力下试样的累积孔压和残余变形发展速率明显不同,两者不能视为等效;单向振动下试样孔压和变形累积更为迅速,从而也更早达到破坏。

受限于试验仪器,单、双向振动对比试验研究开展的并不多<sup>[11]</sup>。本文利用英国 VJ Tech 公司生产的 DSC2000 型动三轴试验系统,开展饱和粉砂动力变形特性试验研究,分别通过单、双向振动三轴试验模拟地震作用,对比饱和粉砂的动力变形特性,并分析造成两种振动下土体动力变形特性差异的深层次机理,进而提出利用单向振动三轴试验代替双向振动三轴试验模拟地震荷载的适用条件。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原理

动三轴试验系统是模拟地震作用下土体的动力特性试验,即先将圆柱体试样在一定压力下固结,再进行振动。双向振动三轴试验,是在不排水条件下在轴向施加循环 $\pm\sigma_d/2$ 的压力,同时在侧向增加 $\pm\sigma_d/2$ 循环压力,使试样 $45^\circ$ 平面上的法向应力保持不变,同时施加 $\pm\sigma_d/2$ 往复循环的周期剪应力,以模拟土层水平面在地震时的应力状态(图 1)。

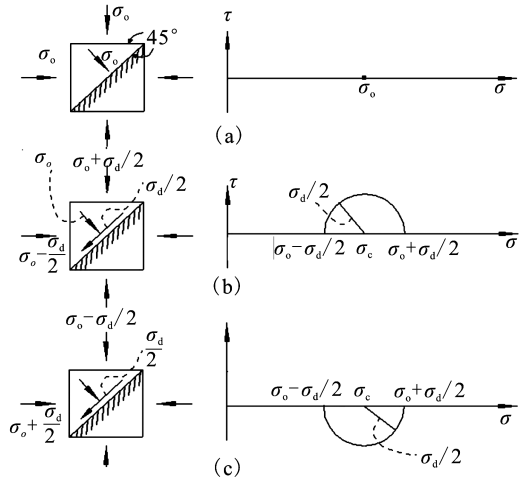


图 1 双向激振试验原理

Fig.1 The principle of bidirectional test

这一试验方式在实际中常用单向振动三轴试验予以替代,即保持侧向压力不变,而在轴向上施加 $\pm\sigma_d$ 循环压力,这样施加于试样 $45^\circ$ 平面上的循环剪应力还是 $\pm\sigma_d/2$ ,但法向应力发生变化<sup>[12]</sup>(图 2)。

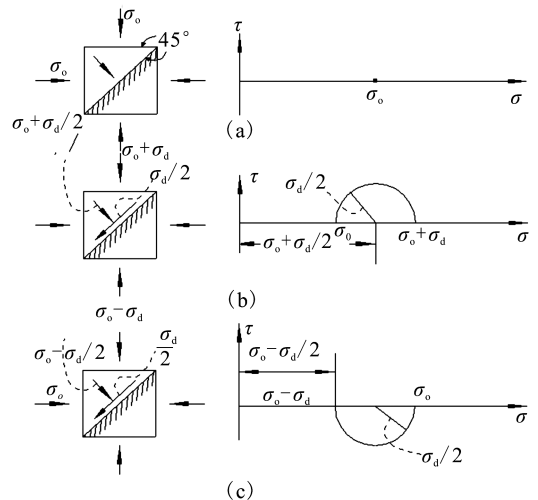


图 2 单向激振试验原理

Fig.2 The principle of unidirectional test

### 1.2 试验材料及仪器

试验采用的土样取自辽宁某尾矿库,属粉砂,粒径曲线如图 3 所示。主要物理指标如表 1 所列。

表 1 尾矿砂的三相比例指标

Table 1 Three-phase proportion index of tailing silty sand

土类	土粒相对密度 $d_s$	密度 $\rho$ / ( $g \cdot m^{-3}$ )	最小干密度 $\rho_{min}$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最大密度 $\rho_{max}$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水率 $\omega/\%$
尾粉砂	3.11	2.06	1.62	2.32	15.42

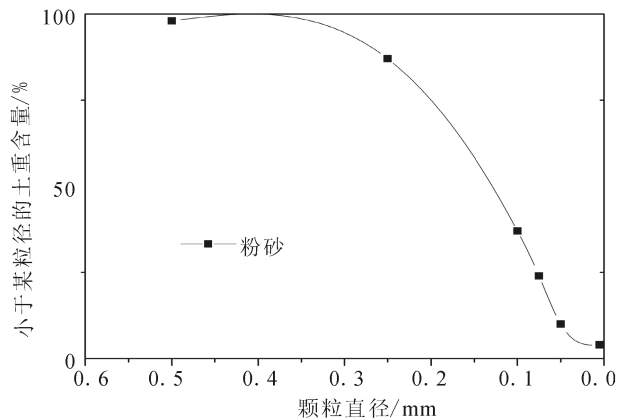


图3 试件粒径级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curve of sample

试验采用英国 VJ 公司生产的 DSC2000 多功能三轴系统。试验过程由自带 CLISP 软件来控制,可以实时查看土样的动孔隙水压力和动应变,便于了解土样的应力应变状态。

### 1.3 试验方法

(1) 试样制备。本次试验采用圆柱体试样,直径 39.1 mm,高度 80 mm。分四层击实。

(2) 饱和阶段。试验采用通水以及加反压的方法进行饱和。

(3) 固结阶段。试验均采用等压固结。

(4) 振动阶段。对同一个试样,分别采用单向及双向振动的方式进行不排水试验,逐级改变 6~10 级动荷载值连续对试样进行振动试验,每级荷载下振动 5 次,取第 2 次的动应力-应变滞回曲线计算试样的动剪切模量。试验共完成 12 个尾粉砂单、双向循环三轴试验,即在三个初始围压下完成单、双向振动试验各两组。详细方案如表 2 所列。

表 2 动三轴实验方案

Table 2 Scheme of dynamic triaxial test

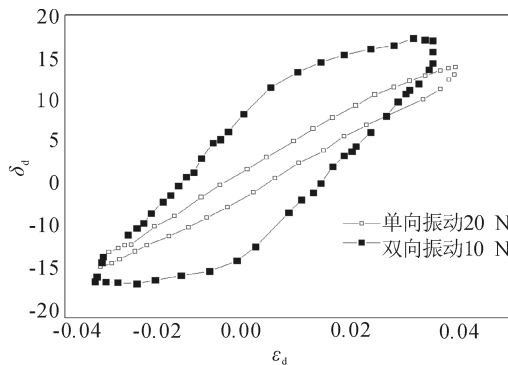
土样 饱和度	围压/ 振动频率/Hz	动弹模量试验	
		单向振动施加的轴力/N	双向振动施加的轴力/N
尾粉砂 饱和	100	4,6,8,10,12,15, 18,20,30	2,3,4,5,6,7,5,9, 10,15
	200	4,6,8,10,15,20, 30,40,50,60	2,3,4,5,7,5,10, 15,20,25,30
尾粉砂 饱和	300	4,6,8,10,15,20, 30,40,60,80	2,3,4,5,7,5,10, 15,20,30, 40

## 2 试验结果与分析

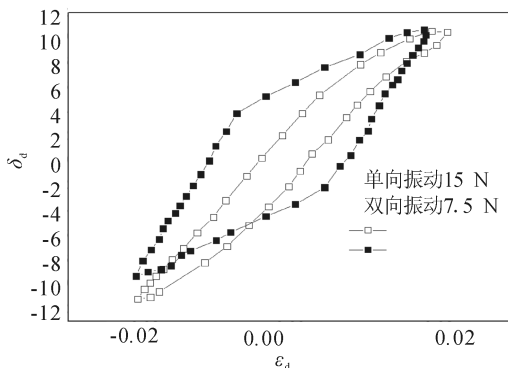
### 2.1 单、双向循环振动时滞回圈比较

滞回曲线主要反映了试样在反复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗,是确定恢复力模型

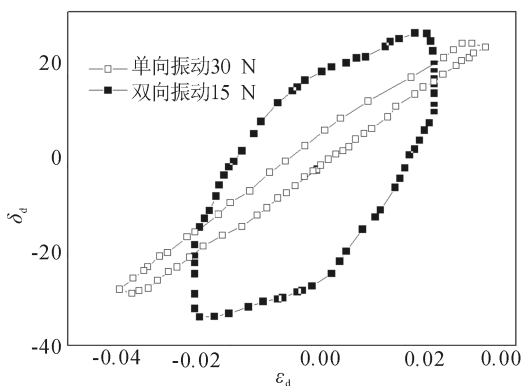
和进行非线性地震反应分析的依据。在单、双向振动条件下,分别选取三组不同围压下相同振动周次的滞回曲线作为对比(图 4)。



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

图 4 不同围压下滞回圈比较

Fig.4 The hysteresis loops under different confining pressures

通过对单、双向振动条件下相同振次的滞回圈比较,可以发现,在双向振动条件下的滞回圈往往比单向振动条件下的饱满,说明在同等应力水平下,试样在双向振动条件下比单向振动条件下耗能更大;滞回曲线在单向振动条件下多呈弓形与反 S 形,而双向振动条件下多为饱满的梭形,说明试样在双向振动条件下的塑性变形能力要比单向振动条件下的强。这与已有的研究报道相吻合<sup>[7]</sup>。

### 2.2 单、双向振动条件下骨干曲线的对比

骨干曲线是指受同一固结压力的土在不同动应力作用下,每一周应力-应变关系曲线滞回圈顶点的连线。它反映了动应力对动应变的非线性。

按照理想的试验方法,在每一级应变荷载幅值下应用一个试件进行试验,即保证试件在振动前的初始剪应力为零,而在一个试样上分级加载所得到的滞回圈与在单个试件上单级加载得到的滞回圈只存在初始剪应力上的偏移差异。因此在数据处理时,应将各级荷载下得到的滞回圈进行平移,以使得初始剪应力为 0。

在将滞回圈按上述方法进行平移后,选取各级应变荷载幅值作用下同一振动周次(本文选取第二周)的滞回圈顶点,分别得到了单、双向振动条件下的骨干曲线(图 5)。

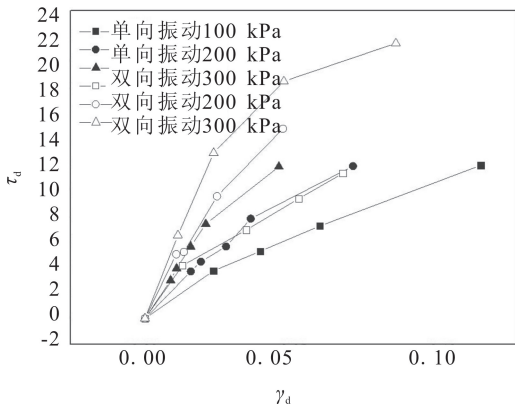


图 5 单、双向条件下骨架曲线

Fig.5 The skeleton curves form unidirectional and bidirectional tests

由骨干曲线可以看到,无论在单向振动条件下还是在双向振动条件下,试验粉砂都体现出了应变硬化的特点,并且骨干曲线随初始围压的增大而上移。这说明试件的强度随围压的增大而增大。通过对比相同初始围压下的骨干曲线可以发现,双向振动条件下得到的骨干曲线要比单向振动条件下的高,说明试样在双向振动条件下的强度要比单向振动条件下高,这与前文对比同周次的滞回圈得到的结论是一致的。

从单、双向激振方式的试验原理可知,两者的差别在于相差一个应力幅值为少的球应力。据此可认为,试样在单向振动条件下出现的滞回圈普遍不饱满以及骨干曲线较低,与此球应力是有关系的,即球应力对土体的变形特性具有影响,而并非 Seed 认为的在饱和土体上施加球应力不会产生累积孔压和变

形,关于此点,前人在对砂土的试验中也有类似的结论<sup>[13-14]</sup>。

#### 2.2.1 骨干曲线的拟合

一般认为,骨干曲线的形态接近双曲线,即

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (1)$$

式中: $\tau_d$  为动剪应力; $\gamma_d$  为动剪应变; $a, b$  分别为试验参数。

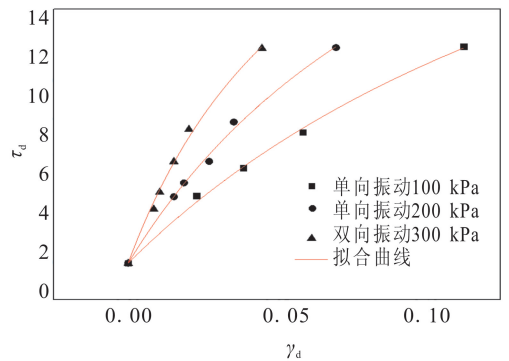
动剪应力和动剪应变与动应力、动应变的关系为

$$\gamma_d = \epsilon_d (1 + \mu) \quad (2)$$

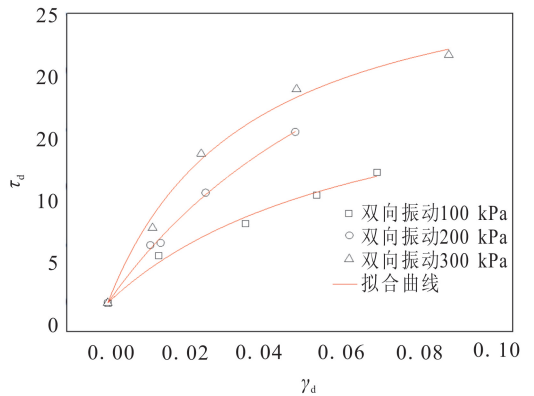
$$\tau_d = \frac{1}{2} \sigma_d \quad (3)$$

式中: $\delta_d$  为动应力; $\epsilon_d$  为动应变; $\mu$  为泊松比(饱和土取 0.5)

根据以上的双曲线模型定义分别对单向及双向振动下得到的骨干曲线进行拟合,结果如图 6 及表 3 所列。



(a) 单向振动



(b) 双向振动

图 6 单、双向振动条件下骨架曲线拟合

Fig.6 Fitting of skeleton curves under unidirectional and bidirectional tests

由上述的试验结果可见,双曲线模型很好地拟合了单、双向振动条件下的骨干曲线。对比相同初始围压下单、双向振动条件下的双曲线模型参数,发

现两者  $b$  值相差不多,但  $a$  值相差较大。进而对参数  $a$  进行分析研究,并尝试找出在研究土体动力条件下变形特性时以单向振动替代双向振动的条件(图7)。

表3 单、双向条件下双曲线模型参数值

Table 3 Value of parameters for hyperbolic model in unidirectional and bidirectional tests

试验分类	初始围压/kPa	$a$ /kPa	$b$ /kPa
单向振动	100	0.006 13	0.029 92
	200	0.003 71	0.030 69
	300	0.002 26	0.033 53
双向振动	100	0.003 02	0.045
	200	0.001 99	0.024 5
	300	0.001 11	0.032

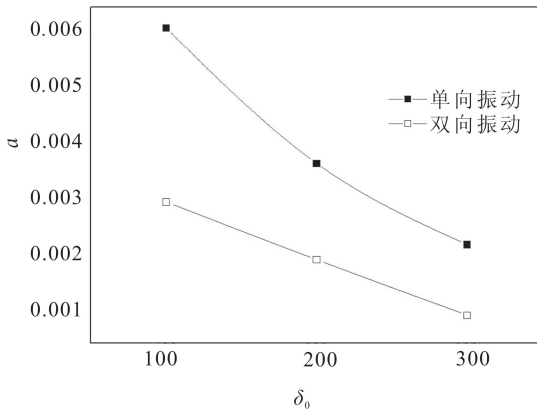


图7  $a$  值与初始围压关系

Fig.7 Relationship between value of  $a$  and initial confining pressure

由图7可以明显地看到,随初始围压的增大,单、双向振动条件下的试验参数  $a$  值相差逐渐变小。可以预见,随着初始围压的增大,两种不同振动方式下的  $a$  值将会无限接近。进一步整理发现  $\Delta a$  与初始围压  $\sigma_0$  呈现出了良好的幂函数曲线关系,假设两者的关系式为

$$\Delta a = a\delta_0^b \quad (4)$$

对试验实际差值用幂函数曲线拟合,结果如图8所示。

根据拟合结果(图8),当初始围压达到 500 kPa 时,单、双向振动条件下的试验参数  $a$  的差值将缩小为 0.000 8。由拟合公式可知,当初始围压为 1 MPa 时,两者的差值将达到 0.000 5 以下。高初始围压条件下土样参数  $a$  接近,因此应将初始围压作为以单向振动代替双向振动条件进行试验的前提之一,并建议此初始围压为 500 kPa 以上。同时在初始围压为 500 kPa 时做了一组验证验证上述假设,

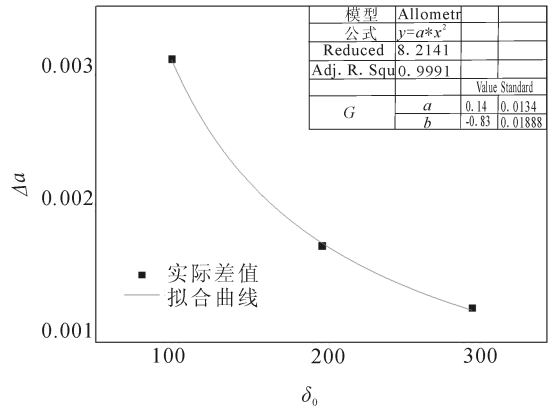


图8  $\Delta a$  与初始围压关系拟合结果

Fig.8 The fitting result for relationship between  $\Delta a$  and initial confining pressure

结果如图9所示。

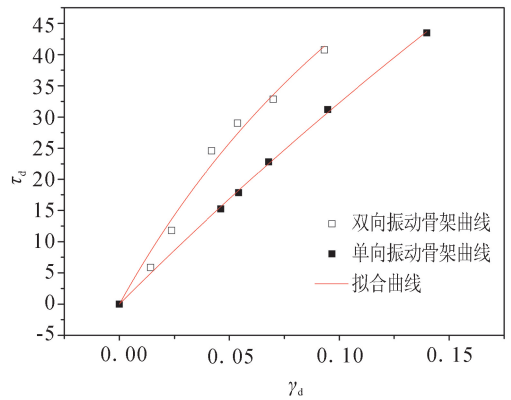


图9 500 kPa 下骨架曲线拟合结果

Fig.9 Fitting result of skeleton curves under 500 kPa

结果显示,初始围压为 500 kPa 时,试样的  $a$  值经双曲线模型拟合,单向振动时结果为 0.002 04,双向振动条件下其值为 0.000 97,两者差值为 0.001 07,与推测的差值 0.000 8 非常接近,足见上述结论是成立的。

### 3 结语

通过一系列重塑饱和尾矿粉砂在单、双向振动条件下的动力变形特性试验,获得两种应力作用方式下的滞回圈与不同初始围压下的动骨干曲线,并采用双曲线模型对两者的骨干曲线进行拟合,通过对比两者的试验参数,给出两者相替代的适用条件。得出的结论主要有:

(1) 在同等应力水平下,相比单向振动条件,试样在双向振动条件下有更强的塑形变形能力,即试样在单向振动条件下更易被破坏。

(2) 两种振动方式下的骨干曲线都体现出了应

变硬化的特点,且骨干曲线随初始围压的增大而增高。双向振动条件下得到的骨干曲线要比单向振动条件下的骨干曲线要高,这说明试件在双向振动条件下的强度要比单向振动条件下的强度高,即球应力对土体的变形特性具有影响,并且双曲线模型可以很好地应用于两种振动方式下的骨干曲线。

(3) 随初始围压的增大,单、双向振动条件下的试验参数  $a$  值相差逐渐变小,而  $b$  值相差不多,因此在以单向振动代替双向振动时,应考虑初始围压门槛值。

## 参考文献(References)

- [1] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of Saturated Sand during Cyclic Loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, 92(6): 105-134.
- [2] Seed H B, Peacock W H. Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(8): 1099-1119.
- [3] Seed H B, Idriss I M. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [4] WANG Hong-jin, SHEN Rui-fu, MA Qi-guo. Dynamic Strength of Soil under Multi-direction Loading [J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36(4): 493-498.
- [5] Yamada Y, Ishihara K. Undrained Deformation Characteristics of Sand in Multi-directional Shear[J]. Soil and Foundations, 1983, 23(1): 61-79.
- [6] 王晶, 陈云敏. 双向循环荷载下饱和软黏土变形特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010(43): 573-576.  
WANG Jing, CHEN Yun-min. Experimental Study on Deformation Behavior of Saturated Soft Clay under Bidirectional Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(43): 573-576. (in Chinese)
- [7] 黄博, 胡俊清, 施明雄, 等. 单、双向动三轴试验条件下饱和砂动力特性对比[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊1): 137-142.  
HANG Bo, HU Jun-qing, SHI Ming-xiong, et al. Comparison of Dynamic Properties of Saturated Sand under Unidirectional and Two-directional Cyclic Triaxial Tests Conditions [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp 1): 137-142. (in Chinese)
- [8] 蔡袁强, 王军, 海钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 495-504.  
CAI Yuan-qiang, WANG Jun, HAI Jun. Study on Strength and Deformation Behaviors of Soft Clay under Bidirectional Exciting Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 495-504. (in Chinese)
- [9] 路江鑫, 孙立强, 曲京辉, 等. 地震荷载作用下饱和粉土地基液化深度试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 544-548.  
LU Jiang-xin, SUN Li-qiang, QU Jing-hui, et al. Experimental Study on Liquefaction Depth of Saturated Silty Soil Ground under Seismic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 544-548. (in Chinese)
- [10] 杨正权, 刘启旺, 刘小生, 等. 超深厚覆盖层中深埋细粒土动力变形和强度特性三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 824-831.  
YANG Zheng-quan, LIU Qi-wang, LIU Xiao-sheng, et al. Triaxial Tests on Dynamic Deformation and Strength Characteristics of Fine-grained Soil in Super-deep Overburden Layer [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 824-831. (in Chinese)
- [11] 谢永涛, 张鸿儒. 不同路径下饱和砂土的动力特性模型[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(1): 43-45.  
XIE Yong-tao, ZHANG Hong-ru. A Dynamic Behaviour Model for Saturated Sand with Different Stress Paths[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(1): 43-45. (in Chinese)
- [12] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
XIE Ding-yi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 陈存礼, 谢定义, 高鹏. 球应力往返作用下饱和砂土变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 513-520.  
CHEN Cun-li, XIE Ding-yi, GAO Peng. Testing Study on Deformation Characteristics of Saturated Sand under Repeated Spherical Stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 513-520. (in Chinese)
- [14] 杨光, 孙江龙, 于玉贞, 等. 偏应力和球应力往返作用下粗粒料的变形特性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(6): 838-841.  
YANG Guang, SUN Jiang-long, YU Yu-zhen, et al. Deformation Characteristics of Coarse Grained Materials during Cyclic Loading of Deviatoric and Spherical Stresses [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2009, 49(6): 838-841. (in Chinese)