地铁列车循环荷载试验论证研究①

丁 智[1]，张 涛[2]，魏新江[1]，张孟雅[1]

(1.浙江大学城市学院 土木工程系，浙江 杭州 310015；2.招商局蛇口工业区有限公司，广东 深圳 518067)

摘要：地铁循环荷载作用下饱和软黏土的动力特性研究对于揭示软黏土在地铁荷载下的孔压、强度以及变形模式具有重要意义，可以为控制地铁长期沉降、降低运营风险提供理论依据。试验加载形式的不同会带来不同的动力特性表征，需选取最能反映地铁列车真实性质的荷载形式。本文在列车荷载作用下研究土动力特性，采用室内动三轴试验的方法，对比分析不同形式下动力荷载作用效果。试验研究表明：偏压正弦波可以作为简化波形研究列车荷载，它不仅可以确保加载过程中地基土只有压应力，而且能较好地模拟列车循环荷载。

关键词：地铁；饱和软黏土；循环荷载；动三轴试验

中图分类号：TU411.8 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2015)03－0789－05

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.03.0789

Experimental Study on the Cyclic Loading of Metro Trains

DING Zhi[1], ZHANG Tao[2], WEI Xin-jiang[1], ZHANG Meng-ya[1]

(1.*Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou* 310015, *Zhejiang, China*;
2.*China Merchants Shekou Industrial Zone Co., Ltd., Shenzhen* 518067, *Guangdong, China*)

Abstract: Research on the dynamic characteristics of saturated soft soil has important significance for revealing the pore pressure, strength, and deformation mode of soft clay under subway loading. It can also provide a theoretical basis for the control of long-term settlement and the reduction of operational risk. Different forms of loading will bring different dynamic characteristic, so a study method must be identified that can reflect the true nature of subway train loads. In this study, we used the laboratory dynamic triaxial test to examine the dynamic characteristics of soil under a train load, and comparatively analyzed the effects of different dynamic loads. The results show that the biased sine wave can be used as a simplified train load wave. It also can ensure that only compressive stress exists in the soil during the process of loading, and it better simulates the cyclic loading of subways.

Key words: subway; saturated soft clay; cyclic loading; dynamic triaxial test

0 引言

长期以来关于土动力学的研究成果层出不穷，室内动三轴试验以其操作简单、数据采集便利、精确度高等优势被广泛应用于土体动力特性的研究。近年来由于各领域的工程需要，土动力学界展开了大量关于交通荷载、波浪荷载以及地震荷载等的试验研究。在这些研究中动三轴仪、空心扭剪仪等试验系统常作为室内试验的首选设备。在室内试验的研究过程中，不同的加载方式会影响土体的动力特性表征。所以有必要在土体动力特性研究过程中对试验所采用的简化荷载进行对比分析，根据所研究的问题选取适当的简化荷载形式。

① **收稿日期**：2014-08-20

基金项目：国家自然基金项目(51278463，51508506)；浙江省自然基金项目(LQ16E080008)

作者简介：丁 智(1983－)，男，安徽铜陵人，讲师，主要从事地铁施工及运营对周边环境影响方面的研究与教学工作。E-mail:dingz@zucc.edu.cn。

纵观几十年来国内外学者以室内动三轴试验为基础对土体动力特性的研究成果，大多数研究者所采用的加载方式是通过和既有研究进行类比，然而当被借鉴的荷载与所研究的方向有区别时试验结果就会产生较大的误差。本文通过对近百篇国内外软黏土动三轴试验相关文献的整理，选取比较有代表性的研究成果进行分析，如表 1 所列。

表 1 已有研究试验条件归纳表

Table 1 Summary of test conditions for existing research

文献	背景	研究内容	固结条件	固结应力/kPa	动应力比	波形	频率/Hz	振次/次
1	列车荷载	长期沉降	等向	25	0.387,0.475,0.61	正弦	0.5	10 000
2	地震荷载	孔压	等向	-	0.27～1.1	正弦	0.01,0.1,0.5,1	3 000
3	地震交通	孔压	偏压	196	0.375～0.6	正弦	0.1	2 000
4	地铁荷载	应变	等向	60～130	0.1～0.4	-	0.5,1,1.5,2	10 000
5	地铁荷载	强度孔压	等向偏压	-	0.06	正弦	0.73,1.22	10 000
6	地震、波浪、交通	应变软化	偏压	-	0.16～0.35	正弦	1	10 000
7	交通荷载	骨干曲线	等向	50,100,150	0.05～0.4	正弦	4	30 00
8	高铁荷载	变形	等向	25～300	0.38～0.66	正弦	1	100 000
9	交通荷载	变形	等向	100,200	0.5,0.25,0.2	三角形	0.5	10 000
10	波浪、交通	应变速率	偏压	-	0.25～0.75	三角形	0.5,0.75,1	100 000
11	交通荷载	长期沉降	等向	100,200	0.2,0.25	正弦	0.5	10 000
12	交通荷载	应变	等向	50、100、150	0.05～0.4	正弦	4	3 000
13	交通荷载	应变	偏压	-	0.416～0.958	正弦	0.01～1	-
14	地震	动模量	等向	-	-	正弦	1	＜2 000
15	交通荷载	动力特性	等向	50,100,150	0.2～1	-	-	10 000
16	打桩	孔压强度	等向	-	0.2～0.5	正弦	-	1 000
17	波浪、交通	孔压	等向	-	-	矩形	0.016 67	2 000

从表 1 可以看出：无论是交通荷载、波浪荷载还是地震荷载，在室内试验研究时动荷载都被简化为正弦波，少数研究者使用了矩形波和三角形波；固结应力 25 kPa 到 200 kPa 不等；动应力比从 0.05 到 1.1不等；频率从 0.01 Hz 到 8 Hz 不等；循环次数基本在 10 000 次以下少数在 50 000 次以上。由于真实荷载类型复杂、采集成本高，加之针对某一交通荷载的研究成果不具有对地铁列车荷载的普遍适用等原因，在室内试验研究地铁列车荷载时采用简化的荷载形式是一种合理的选择，但需要尽量保留列车荷载的主要特性不至于太失真。在现有研究中很多研究者在没有加以论证的情况下直接参照了以往的研究成果。为尽量消减试验所用波形产生的试验误差，本文在研究土体动力特性时将对地铁列车的简化荷载选取和论证进行研究，以弥补以往研究的不足。

1 试样制备

试验用土取自杭州地铁 1 号线沿线某基坑工地。关于重塑土制备，以往研究大多将某一含水率黏土放入击实器中分层击实，这种方法制备的重塑土操作简单、易于实现，但很难达到土工规范中“同一组试样密度相同”的标准且均匀性也无法保证，很多成型的试样仍存在分层问题。为了克服传统重塑土制作方法的种种弊端，本研究在制备重塑土的过程中采用对搅拌均匀的泥浆进行真空固结的方法，将泥浆在浙江大学城市学院重塑土制备仪中做成均匀的重塑土块(一般历时 20 天)，其含水率 42.19%～46.22%，比重 2.68，塑限 18.4，液限 52.5，塑性指数 34.1，同一批次制备的土样物理参数相同，且不同批次制备的土样性能也相近。根据相应的试验方案将重塑土块切成 $D\times H=38$ mm$\times 76$ mm，$D\times H=50$ mm$\times 100$ mm 等尺寸的圆柱体，按照土工试验规程 SL237-1999 的要求进行真空饱和：将试样装入饱和器放置在负压为 -0.1 MPa 的真空缸中，抽真空 3 小时后向真空缸中缓慢注入无气水直至淹没试样，继续维持 0.1 MPa 负压半小时后缓慢打开进气阀，使试样在大气压中静置 12 小时以上，此时试样饱和度可确保在 0.98 以上；将试样装入动三轴仪的压力舱后分级施加反压继续饱和。为防止反压迅速变化可能产生的试样扰动和结构破坏，在分级饱和的过程中始终保持围压和反压的差值为 20 kPa，第一级反压 130 kPa，围压 150 kPa，饱和时间 30 min，孔压稳定后采用线性加载的方式施加第二级饱和荷载(反压 180 kPa，围压 200 kPa，历时时间 30 min)；采用与第二级相同的加载方式施加第三级荷载(反压 230 kPa，围压 250 kPa，饱和时间 60 min)。

饱和后程序立即进入 B 检测阶段，由于试样进行了两次饱和，本组试样可确保 B 检测值在 5 min 内达到0.98甚至更高。

2　验证方案及结果分析

在进行列车荷载加载时采用杭州地铁的真实参数：列车共 6 节车厢，总长度 120 m 左右，正常运营情况下最高时速可达 80 km/h，平均时速 37 km/h 以上。综合考虑不同形式荷载的对比性以及列车荷载的不完整性等因素，试验中将列车通过时间设置为 5 s，等效时速 86.4 km/h。图 1 是杭州地铁的列车模型，当地铁经过时地基土某一点所受动荷载形式如图 2。

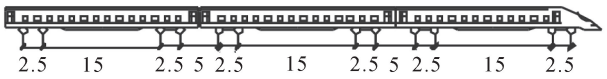

图 1　杭州地铁列车模型（单位：m）

Fig.1　The model of Hangzhou subway train (Unit: m)

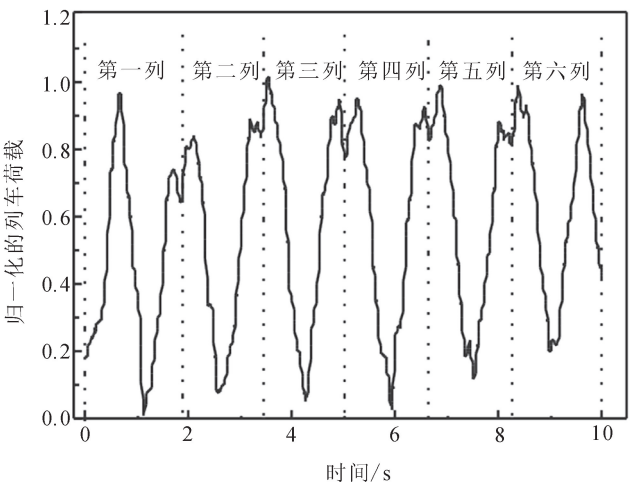

图 2　列车荷载形式

Fig.2　The form of train load

2.1　试验方案

为了对比不同形式动荷载与列车荷载作用效果相似度，选取常用的正弦波、三角形波、矩形波和偏压正弦波。其中偏压正弦波的施加方式与以往研究不同：本文所施加的偏压既不在固结阶段也不在固结结束时，而是与正弦波同时施加，如此可以反映列车通过的瞬间才产生偏压的状态。实验方案见表 2。

2.2　试验结果分析

在不同形式的循环荷载作用下软黏土所表现出来的动力特性会有所差异，通过这种差异分析，在模拟列车荷载时可以选取最接近真实情况的简化荷载。

表 2　荷载对比方案

Table 2　The scheme of load

试样编号	固结应力/kPa	试验波形	排水条件	频率/Hz	循环次数/次
C-1	200	正弦波	不排水	1	50 000
C-2	200	三角形波	不排水	1	50 000
C-3	200	矩形波	不排水	1	50 000
C-4	200	偏压正弦波	不排水	1	50 000
C-5	200	列车荷载	不排水	0.2	50 000
C-6	200	偏压正弦波	排水	1	50 000

2.2.1　孔压试验结果分析

图 3 是在固结条件相同时不同振动荷载下的软黏土孔压发展时程曲线，可以看出：在上述荷载作用下孔压在初始阶段均表现为急骤上升的趋势，随着振动次数的增加孔压增幅变缓，并在后期趋向某一稳定值。但不同振动荷载下孔压发展情况仍有所不同：在不排水条件下矩形荷载、三角形荷载以及正弦荷载，三者孔压发展较为接近，相较于列车荷载作用下的孔压发展趋势，后者在较少的振动次数下即可进入稳定阶段。图 3 表明矩形荷载下，孔压在 30 000次循环后基本趋于稳定；三角形荷载、正弦荷载作用下，孔压在 50 000 次循环时仍有上升趋势；而列车荷载作用下 15 000 次左右时已趋于稳定。偏压正弦荷载下，孔压发展模式与列车荷载下的孔压较为接近，在 15 000 次左右时也进入稳定阶段，只是最终的稳定值要略高于列车荷载下的孔压。在模拟列车荷载下软黏土的不排水孔压时偏压正弦波比矩形波、三角形波以及正弦波效果更好，且模拟结果偏于保守。

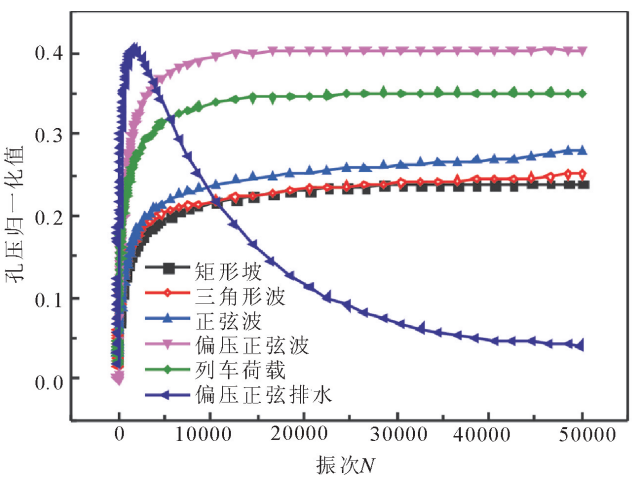

图 3　不同荷载条件下的孔压发展规律曲线

Fig.3　The curves of pore pressure under different loading conditions

在排水条件下,孔压会经历迅速上升、下降、趋于稳定三个阶段,在本次试验中经过 1 691 次振动后,孔压将达到峰值。

2.2.2 应变实验结果分析

图 4(a)为矩形波下软黏土轴向应变随循环次数的发展趋势。可以看出在矩形荷载下轴向应变在循环开始时拉压等幅,随着振动次数增加压应变出现了先减小后增大的趋势,而拉应变与之相反,表现为先增大后减小,整个过程拉应变占据主导地位。

图 4(b)在三角形荷载作用下压缩应变随着振动次数的增加逐渐增大,拉伸应变逐渐减小,最终压应变略大于拉应变。

图 4(c)在正弦荷载作用下,循环开始时拉应变与压应变等幅,随振次增加拉应变增大,压应变减小,最终拉伸应变仍然存在,但远小于压缩应变。

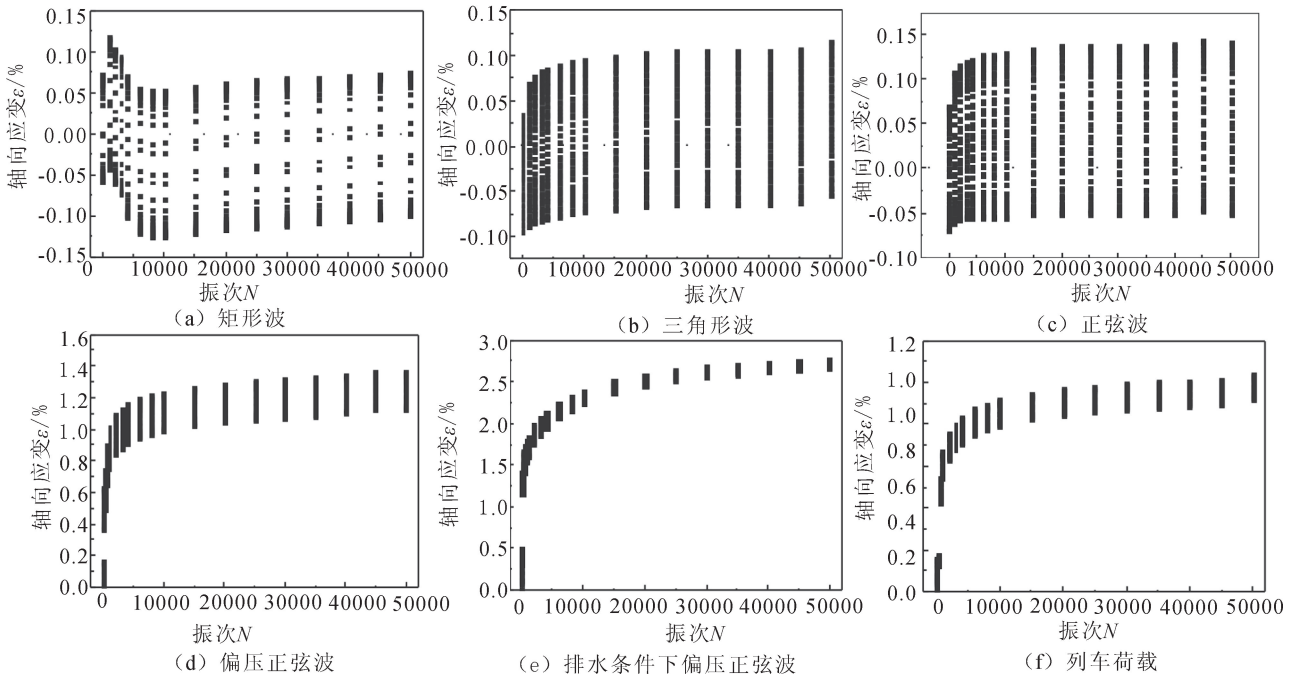

图 4 不同荷载作用下的应变

Fig.4 The strain under different loads

图 4(d)是偏压正弦波下的应变发展趋势。在循环初始阶段累计变形迅速增加并逐步趋于稳定,在整个过程中只存在压缩变形。

图 4(e)是排水条件下施加偏压正弦波的应变形态。在现实工况下,由于黏土地基处于排水与不排水之间,应适当考虑一定的排水因素。与不排水条件下的变形相比,孔隙水的排出会使土体在动载下的累积变形进一步增加。

在真实的列车荷载作用下不会产生拉力,土体只存在压缩变形,并且在荷载施加初期变形速率较快,随着振动次数的增加变形速率逐渐减小,最终达到稳定[图 4(f)]。

对比不同动载下软黏土轴向应变随循环次数的发展趋势,真实的列车荷载作用下:在循环初始阶段累计变形迅速增加并逐步趋于稳定,整个过程中只存在压缩变形,从这一方面来说偏压正弦荷载更逼近真实的列车荷载。黄博等[18]在研究列车荷载时曾提出用半正弦波来模拟,在半正弦波下虽然土体不会产生拉应力,但半正弦波不能反映列车的瞬时偏压。王常晶等[19]研究表明列车经过时是存在偏压的,但在试验模拟过程中所采用的是先施加偏应力再施加动载的方式。综合上述分析,偏压正弦荷载用于模拟列车试验荷载时比矩形波、三角形波、正弦波、半正弦波更优越,可兼顾真实性、可重复性、简便易操作等方面的优势。

3 结语

归纳总结近年来采用室内动三轴试验研究软黏土动力特性时的加荷条件,在已有研究的基础上论证室内试验模拟地铁列车循环荷载的可行性,对荷载控制方式进行研究并获得到以下结论:

(1) 在列车荷载作用下,地基土中只有压应力

而没有拉应力，因而采用正弦波、三角形波、矩形波来模拟列车荷载是不合理的。

（2）偏压和正弦波同时施加的偏压正弦波循环荷载可以较好地模拟列车荷载，该种波形式简单、可重复性强，在室内试验中具有普遍适用的优点，方便对比。

（3）列车荷载下地基土的排水状态介于排水与不排水之间。在黏土地基中，由于土体自身排水性能差，加之振动时间短，可以根据排水体积的多少对不排水变形的结果进行修正，从而获得更为精确的结果。

参考文献(References)

[1] 王常晶，姬美秀，陈云敏.列车荷载作用下饱和软黏土地基的附加沉降[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集.北京：清华大学出版，2003：1118-1122.
WANG Chang-jing，JI Mei-xiu，CHEN Yun-min. Train-load-induced Settlements of Soft Clay Subgrade[C]//Proceedings of 9th Chinese National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing：Tsinghua University Press，2003：1118-1122.(in Chinese)

[2] Atilla M Ansal，Ayfer Erken. Undrained Behavior of Clay Under Cyclic Shear Stress[J]. Geotech Engrg，1989，115：968-983.

[3] M Hyodo，K Yasuhara，K Hirao. Prediction of Clay Behavior in Undrained and Partially Drained Cyclic Triaxial Tests[J]. Soils and Foundation，1992，32(4)：117-127.

[4] 唐益群，黄雨，叶为民，等.地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J].岩石力学与工程学报，2003，22(9)：1564-1568.
TANG Yi-qun，HUANG Yu，YE Wei-min，et al. Critical Dynamic Stress Ratio and Dynamic Strain Analysis of Soils Around the Tunnel Under Subway Train Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(9)：1564-1568.(in Chinese)

[5] 叶俊能，陈斌.海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J].岩土力学，2011，32(增刊 1)：55-60.
YE Jun-neng，CHEN Bin. Dynamic Strength and Pore Pressure Property of Marine Deposit Soft Clay[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(Supp.1)：55-60.(in Chinese))

[6] 蔡袁强，陈静，王军.循环荷载下各向异性软黏土应变-软化模型[J].浙江大学学报：工学版，2008，42(6)：1058-1064.
CAI Yuan-qiang，CHEN Jing，WANG Jun. Strain-degradation Model for Anisotropic Soft Clay Under Cyclic Loading[J]. Journal of Zhejiang University：Engineering Science，2008，42(6)：1058-1064.(in Chinese)

[7] 张勇，孔令伟，李雄威.循环荷载下饱和软黏土的动骨干曲线模型研究[J].岩土力学，2010，31(6)：1699-1704，1708.
ZANG Yong，KONG Ling-wei，LI Xiong-wei. Dynamic Backbone Curve Model of Saturated Soft Clay Under Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(6)：1699-1704，1708.(in Chinese)

[8] 陈颖平，黄博，陈云敏.循环荷载作用下软粘土不排水累积变形特性[J].岩土工程学报，2008，30(5)：764-768.
CHNE Ying-ping，Huang Bo，CHEN Yun-min. Reliability Analysis of High Level Backfill Based on Chaotic Optimization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2008，30(5)：764-768.(in Chinese)

[9] 黄茂松，李进军，李兴照.饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J].岩土工程学报，2006，28(7)：891-895.
HUANG Mao-song，LI Jin-jun，LI Xing-zhan. Cumulative Deformation Behavior of Soft Clay in Cyclic Undrained Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2006，28(7)：891-895.(in Chinese)

[10] 刘添俊，莫海鸿.长期循环荷载作用下饱和软黏土的应变速率[J].华南理工大学学报：自然科学版，2008，3(10)：37-42.
LIU Tian-jun，MO Hai-hong. Strain Rate of Saturated Soft Clay Under Long-term Cyclic Loading[J]. Journal of South China University of Technology：Natural Science Edition，2008，3(10)：37-42.(in Chinese)

[11] 魏星，黄茂松.交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J].岩土力学，2009，30(11)：3342-3346.
WEI Xing，HUANG Mao-song. A Simple Method to Predict Traffic-load-induced Permanent Settlement of Road on Soft Subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(11)：3342-3346.(in Chinese)

[12] 张勇，孔令伟，郭爱国，等.循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J].岩土力学，2007，30(6)：1542-1548.
ZHANG Yong，KONG Ling-wei，GUO Ai-guo，et al. Cumulative Plastic Strain of Saturated Soft Clay Under Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics，2007，30(6)：1542-1548.(in Chinese)

[13] 王军，蔡袁强.循环荷载作用下饱和软黏土应变累计模型研究[J].岩石力学与工程学报，2008，27(2)：331-338.
WANG Jun，CAI Yuan-qiang. Study on Accumulative Plastic Strain Model of Soft Clay under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，27(2)：331-338.(in Chinese)

[14] 黄博，施明维，陈云敏，等.循环振动对饱和粉土初始动剪模量的影响[J].岩土工程学报，2009，31(5)：764-771.
HUANG Bo，SHI Ming-wei，CHEN Yun-min，et al. Effects of Seismic Vibration on Small Strain Shear Modulus of Saturated Silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，31(5)：764-771.(in Chinese)

[15] 刘添俊，葛修润，安关峰.单向循环荷载作用下饱和软黏土的性状研究[J].岩石力学与工程学报，2012，31(增刊 1)：3345-3351.
LIU Tian-jun，GE Xiu-run，AN Guan-feng. Study of Characteristics of Saturated Soft Clay Under Uniaxial Cyclic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2012，31(Supp.1)：3345-3351.(in Chinese)

（下转 802 页）

[3] Seed H B, Idriss I M. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes[R]. Oakland, Calf: Earthquake Engineering Research Institute Monograph, 1982.

[4] Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations [J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1985, 111(12): 1425-1445.

[5] National Research Council (NRC). Liquefaction of Soils During Earthquakes[M]. Washington, D.C: National Academy Press, 1985.

[6] T L Youd, I M Idriss, et al. Liquefaction Resistance of Soils Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF[J]. Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 8: 297-313.

[7] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
LI Jie, LI Guo-qiang. Introduction of Earthquake Engineering [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992. (in Chinese)

[8] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
GU Gan-chen, SHEN Chang-song, CEN Wei-jun. Earthquake Engineering for Earth-rockfill Dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)

(上接 793 页)

[16] 聂庆科, 白冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 724-729.
NIE Qing-ke, BAI Bing, HU Jian-min, et al. The Pore Pressure Model and Undrained Shear Strength of Soft Clay Under Cyclic Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supp.): 724-729. (in Chinese))

[17] Ne Wilson, J R Greenwood. Pore Pressure and Strains After Repeated Loading of Saturated Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11: 269-277.

[18] 黄博, 丁浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195-202.
HUANG BO, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of High-speed Train Load by Dynamic Triaxial Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33 (2): 195-202. (in Chinese)

[19] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (11): 1742-1747.
WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Study on Effect of Traffic Loading Induced Static Deviator Stress on Undrained Cyclic Properties of Saturated Soft Clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 29 (11): 1742-1747. (in Chinese)