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

王常晶[1,2]，陈云敏[1]

（1.浙江大学岩土工程研究所，浙江 杭州 310027；2.浙江大学城市学院，浙江 杭州 310015）

摘 要：为研究交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土的不排水循环性状的影响，设计了室内不排水动三轴试验，将动应力简化为静偏应力与正弦荷载的叠加，研究了静偏应力对饱和软黏土变形、孔压发展规律以及动强度的影响。研究表明，静偏应力对土体动力特性影响很大，加快了塑性变形、残余孔压发展，降低了动强度曲线，减小了最小极限循环强度。且静偏应力的影响随着静偏应力的增大而显著。研究结果说明，交通荷载引起的动应力作用下，饱和软黏土更容易破坏。

关键词：交通荷载；静偏应力；不排水循环三轴试验；循环荷载

中图分类号：TU435 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2007)11－1742－06

作者简介：王常晶(1978－)，女，博士，讲师，主要从事列车振动方面的研究工作。E-mail: wangcj@zucc.edu.cn。

Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay

WANG Chang-jing[1,2], CHEN Yun-min[1]

(1. Geotechnical Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310017, China; 2. City College of Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to study the effect of traffic loading induced static deviator stress on the undrained cyclic properties of saturated soft clay, an undrained cyclic triaxial test was designed. The cyclic loading was simplified as sine wave plus static deviator stress. And the effect of static deviator stress on deformation, pore pressure and cyclic strength of soft clay was studied. It was found that the static deviator stress greatly affected the cyclic properties of soft clay. The development of plastic deformation and residual pore pressure was accelerated, the cyclic strength curve lowered and the minimum limited cyclic strength was reduced. And its effect increased with the increasing of static deviator stress. It was shown that saturated soft clay was easier to fail under traffic loading induced dynamic stress.

Key words: traffic loading; static deviator stress; undrained cyclic triaxial test; cyclic loading

0 引 言

随着我国经济建设的蓬勃发展，交通工程建设发展速度越来越快，其中许多重要交通基础设施是建设在深厚软黏土地基之上的。在这些工程施工建设和投入运营的过程中，发现一个普遍存在问题，即工程竣工投入运营之后，软土地基的沉降很大，甚至远远大于施工期地基的沉降量[1-2]。在国外的一些监测实例中也发现了同样的现象[3]。监测数据表明，在交通移动荷载引起的动应力作用下，地基的长期附加沉降是非常可观的，甚至直接影响工程的正常使用。目前我国高速铁路刚刚进入实质性的建设阶段，京沪高速铁路已经获得批准，各铁路干线列车提速也正在进行中，正确分析和预测地基长期附加沉降对保证已有设施的安全运营和指导今后重大项目的建设具有重要意义，而研究饱和软黏土在交通荷载作用下的动力特性是其中的一个重要部分。

已经有许多研究者通过室内三轴试验来研究软黏土的变形和孔压发展特性，分析各种因素对土体循环动力特性的影响，并通过对试验结果进行分析，建立循环应变和孔压的发展规律[3-10]。一些研究表明，交

基金项目：国家自然科学基金重点资助项目（50538010）；高等学校博士学科点专项科研基金项目（20040325083）；浙江大学城市学院教师科研基金项目（J52407017）

收稿日期：2006－10－26

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

通荷载有别于地震荷载和波浪荷载[11-14]。而交通荷载作用下土体动力特性的研究也因荷载的特殊性而有别于以往的相关研究。实际上目前的试验研究工作并没有针对交通荷载的特点进行设计，不能很好地反映出交通荷载特性，如交通荷载引起的静偏应力，对饱和软黏土特性的影响，而文献[3]和文献[10]中的初始静偏应力主要是模拟循环荷载作用前，由于堆载和地基自重等产生的应力。

本文针对交通荷载作用下地基土单元的受力特点，结合浙江大学岩土工程研究所已有研究成果和土工实验室条件，设计了室内不排水动三轴试验，利用 GDS10 Hz/20 kN 双向振动三轴仪模拟具有静偏应力的循环荷载，研究了静偏应力对萧山原状饱和软黏土的变形、孔压发展规律和强度的影响。

1　室内动三轴试验设计

1.1　交通荷载的特点及试验设计

理论和实测都表明，交通荷载有低幅、低频、作用时间长等特点[12-16]。另外，列车引起的动应力是一种单向脉冲模式而非双向正弦模式，见图 1 所示。动应力以一定的应力值为基准循环变化，这里将其称为交通荷载引起的静偏应力，简称静偏应力。将循环变化的应力幅值的一半定义为循环应力。在一列列车通过时，静偏应力保持不变，循环应力部分才使应力具有循环特性。具有静偏应力是交通荷载引起的循环荷载与地震荷载、波浪荷载等循环荷载的一个主要不同之处。

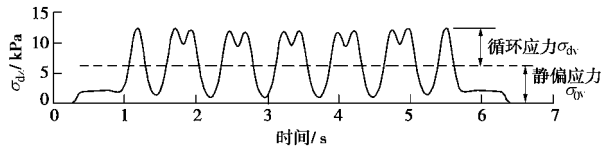


图 1 列车引起的动应力

Fig. 1 Dynamic stress induced by a train

图 2 是用正弦曲线对一列列车通过时引起的循环荷载的拟合，从中可以看出用正弦荷载来模拟每一列列车通过引起的动应力完全可以满足要求。本文暂不考虑行车间隔的影响，试验中的动荷载为连续的具有静偏应力的正弦荷载。根据列车荷载的低频特性，动荷载频率均选为 1 Hz。试验中选择固结压力 100 kPa，这接近于试验土体的结构屈服应力。试验中均采用等压固结，$K_c = 1.0$。

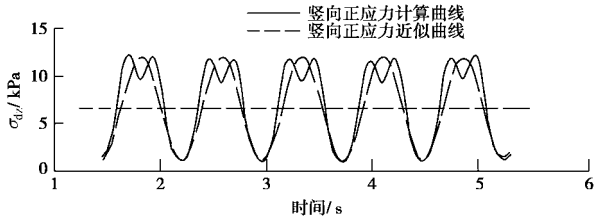


图 2 竖向正应力计算曲线和拟合曲线

Fig. 2 Calculated and fitted curves of vertical stress

1.2　试验仪器和试验土样

本试验仪器设备主要为 GDS 10 Hz/20 kN 双向振动三轴系统，它可在 10 Hz 范围内同时进行轴压和围压的循环加载（双向独立控制，并可以自定义波形，轴压为应力控制式，围压为应力控制式）。

本试验中采用的土样为原状萧山软黏土，主要物理力学参数见表 1。从试样的压缩曲线上可以确定土样的先期固结压力为 60 kPa，结构屈服应力为 120 kPa。

1.3　试验中的循环荷载

安装土样并使其在 100 kPa 围压下排水固结，待固结完成后，将土样与仪器拉力帽接合紧密，关闭排水阀门，先施加静的轴向偏应力，待偏应力达到预定值后，立刻施加对称的正弦循环荷载，加载参数见表 2，加荷方式为应力控制式。

图 3（a）是施加静偏应力为 0 的循环荷载时（循环荷载幅值 σ_{dv}），理论动荷载曲线和土样 45°平面上正应力和剪应力曲线。图 3（b）是静偏应力为 σ_{0v} 的循环荷载（循环荷载幅值 σ_{dv}）对应的理论荷载曲线。与无静偏应力的情况相比，45°平面上的剪应力曲线为有静偏应力 $\sigma_{0v}/2$ 的正弦循环剪应力，土体受到的最大剪应力增大了 $\sigma_{0v}/2$。试验中实际荷载曲线与理论曲线有一定差别。

表 1 动力试验中萧山软黏土物理力学指标

Table 1 Parameters of Xiaoshan soft clay

重度 γ/ (kN·m^{-3})	初始孔隙比 e_0	含水率 w/%	比重 G_s	塑限 w_P/%	液限 w_L/%	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	黏聚力 c_{cu}/kPa	内摩擦角 φ_{cu}
17.93	1.225	48.4	2.744	25	58	33	0.709	15.4	12.6

表 2 单向激振动三轴试验应力参数

Table 2 Stress parameters in dynamic triaxial tests

围压/kPa	静偏应力比 $\sigma_{0v}/2\sigma_c'$	循环动应力比 $\sigma_{dv}/2\sigma_c'$					
100	0.0		0.195	0.23	0.29	0.32	0.355
	0.1	0.19	0.195	0.23	0.29	0.305	0.33
	0.2	0.18	0.195	0.23	0.28		

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

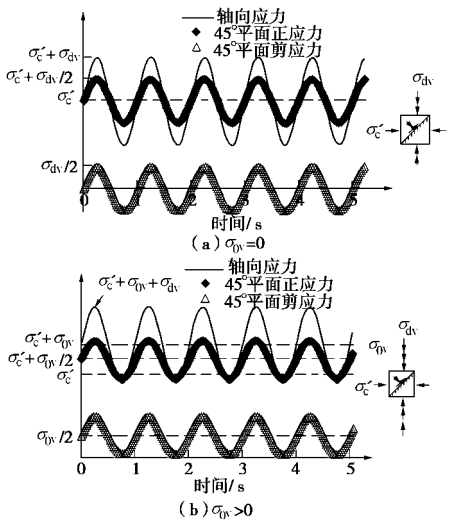


图 3 循环荷载理论曲线

Fig. 3 Theoretical cyclic loading curves

2 试验结果及分析

图 4 是静偏应力比为 0 试验中典型的动应力、轴向应变和孔压的过程线，土体承受拉压对称的循环荷载。动应力在一定振次后开始衰减，表明一定振次后土样结构开始破坏，出现软化现象。可以把动应力开始衰减作为土样结构破坏的标志。轴向应变的拉、压应变幅值都随着振次的增大而增大，开始时拉应变增大的速度要大于压应变，但到一定振次后，拉应变开始减小，压应变则继续增大，整个过程中双幅轴向应变一直增大。孔压也随着振次的增大而增大，孔压的增长速度随振次的增大而减小，并趋于稳定。

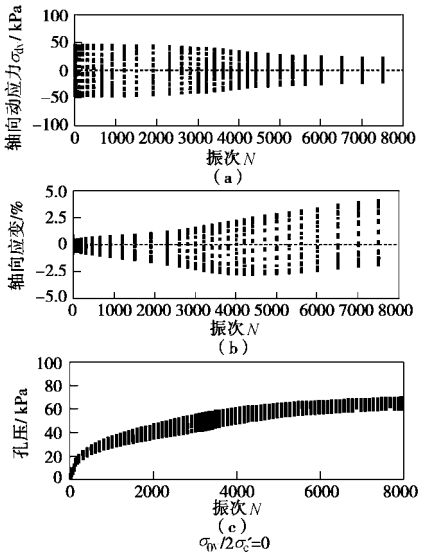


图 4 动应力、轴向应变和孔压变量过程线

Fig. 4 Curves of dynamic stress, axial strain and pore pressure

图 5 是静偏应力比为 0.1 的试验中动应力、轴向应变和孔压变量的过程线。孔压的发展规律与无静偏应力振动试验中的孔压发展规律相似。由于静偏应力的存在，使得动荷载具有较强的脉冲特性。到一定振次后，荷载幅值开始减小。应变的发展规律与无静偏应力情况有很大不同，即使荷载仍存在拉应力，应变从一开始就只存在压应变，应变随振次的增大而增大，而且增长速度越来越快。静偏应力比 0.2 的试验中动应力、应变和孔压的过程线与图 5 中的曲线非常相似，只是振动初期应变的发展速率要显著提高，这里不再给出。

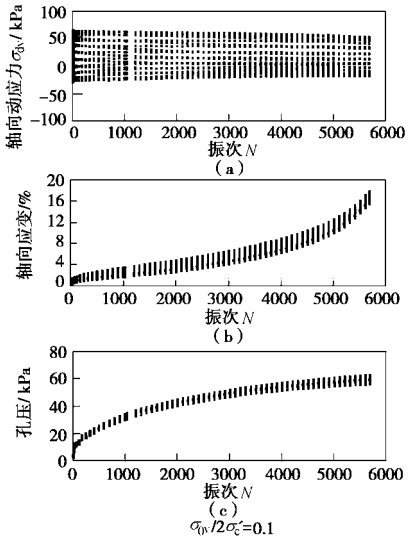


图 5 动应力、轴向应变和孔压变量过程线

Fig. 5 Curves of dynamic stress, axial strain and pore pressure

图 6（a）是静偏应力为 0 的双幅轴向动应变－振次关系曲线，可以看出应变在加荷初期发展缓慢，当循环荷载作用到一定次数后，出现应变转折点，土样变形开始急剧增大，出现突然破坏的现象。这个振次被定义为破坏振次 N_f，对应的应变为转折应变 ε_{tp}[9]。破坏振次与图 4（a）中轴向动应力开始衰减时的振次相同。循环应力幅值越小，破坏振次越大，对应的转折应变越小。当应力幅值小到一定程度后，破坏振次将趋近于无穷大，意味着无论荷载作用多长时间，土体发生因塑性变形累积而破坏的现象，此时所对应的循环应力比被称为最小极限循环强度[17]。图 6（b）是静偏应力比为 0.1 的试验中双幅轴向应变－振次关系曲线，曲线形状与无静偏应力的结果相似，应变在加荷初期发展缓慢，当循环荷载作用到一定次数后，出现应变转折点，土样变形开始急剧增大，出现突然破坏的现象。图 6（c）是静偏应力比 0.2 时，双幅轴向应变随振次变化的曲线。对比图 6（a），图 6（b）和图 6（c）可以知道，相同动应力幅值下，静偏应力越大，破坏振次减小，对应的转折应变增大。

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

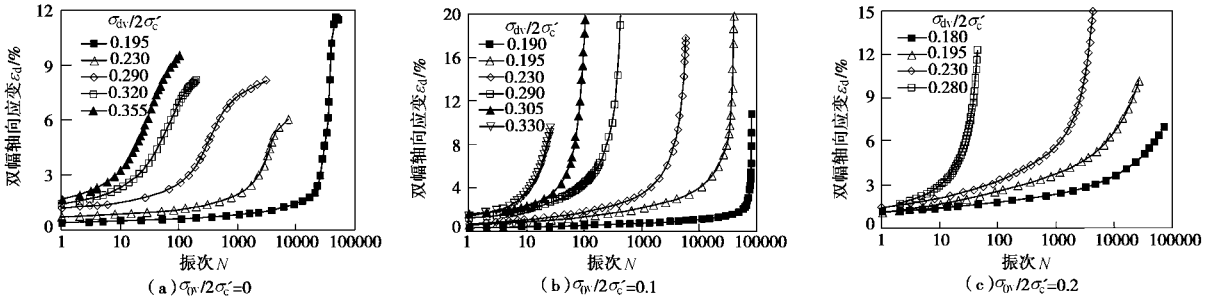


图 6 不同循环应力幅值下的 ε_d-N 曲线

Fig. 6 Curves of ε_d-N under different cyclic stress amplitudes

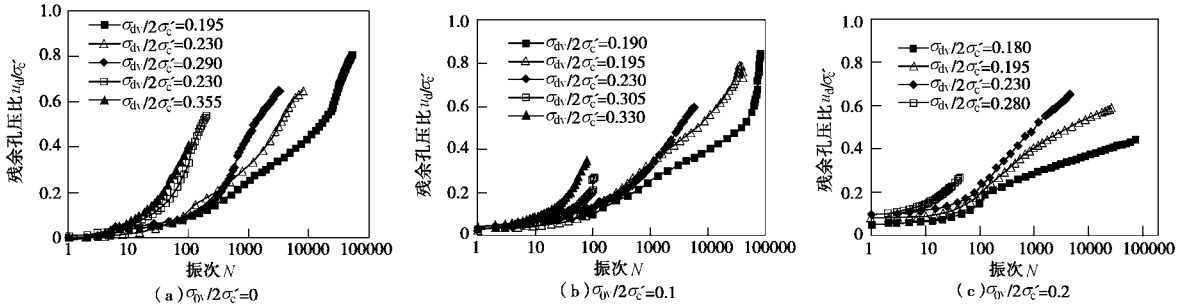


图 7 不同循环应力幅值下的 u_d-N 曲线

Fig. 7 Curves of u_d-N under different cyclic stress amplitudes

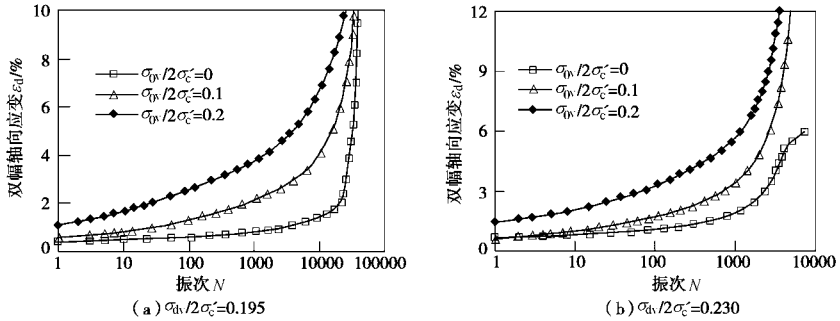


图 8 不同静偏应力下的 ε_d-N 关系曲线

Fig. 8 Curves of ε_d-N under different static deviator stresses

图 7（a）是静偏应力为 0 的残余孔压－振次关系曲线，从中可以看出，循环应力幅值越大，孔压发展速度越快，在相同振次时，动孔压越大。但由于循环应力幅值较大时，土体在较少的循环振次内就达到破坏，孔压发展很快，而仪器中孔压传感器是安装在试样底部，孔压测量有一定的滞后性，使得测量到的破坏时对应的动孔压处于较低水平，实际试样中的动孔压水平应该高于测量值。图 7（b）是静偏应力比为 0.1 的试验中不同循环应力幅值下的残余孔压－振次关系曲线，孔压发展规律与无静偏应力的情况相似。图 7（c）是静偏应力比为 0.2 的试验中孔压－振次关系曲线，由于静偏应力的增大使得孔压发展速度很快，而孔压传感器测量的滞后性使得试验结束时测量到的孔压水平更低。测量值与实际值之间的差距随着静偏应力和动应力幅值的增大而增大，所以改进孔压测量方法就显得非常必要，尤其是静偏应力或动应力幅值较大时。

图 8（a）和图 8（b）分别是循环应力比为 0.195 和 0.23 时不同静偏应力比的轴向应变－振次关系曲线。静三轴试验中，本试验所用土样 100 kPa 围压固结后的应力－应变曲线上，对应 20 kPa 和 40 kPa 偏应力的应变分别约为 0.09%和 0.4%，相对土样在循环动应力作用下的变形来说，静偏应力引起的初始应变是非常小的。但是由于静偏应力引起的初始剪应力的存在，土样变形发展加快。而且静偏应力越大，对土体变形影响越大。

图 9（a）和图 9（b）分别是循环应力比为 0.195 和 0.23 时，不同静偏应力下动孔压－振次关系曲线。从中可以看出静偏应力越大，动孔压发展越快，但静

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

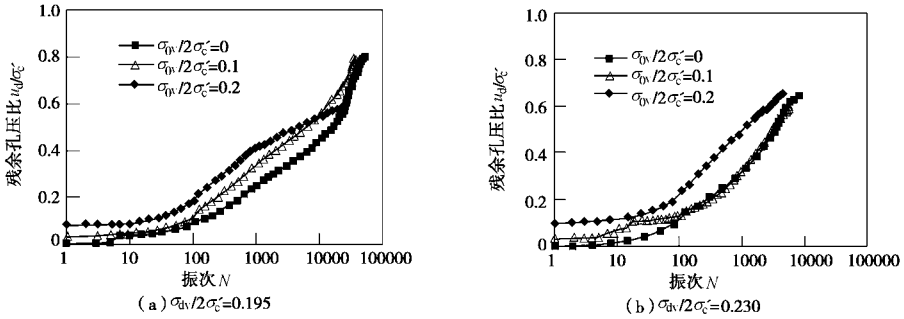


图 9 不同静偏应力下 u_d-N 关系曲线

Fig. 9 Curves of u_d-N under different static deviator stresses

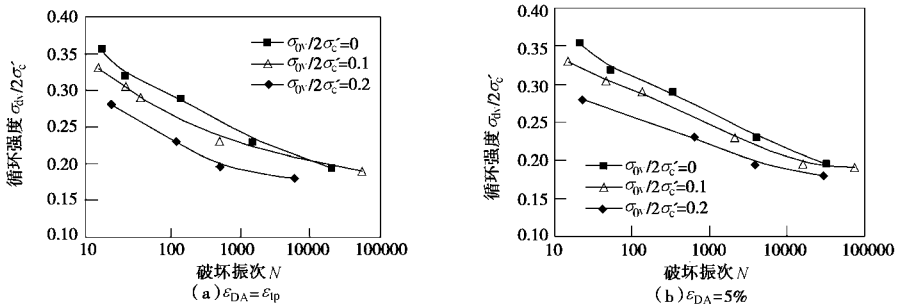


图 10 不同静偏应力比的循环强度曲线

Fig. 10 Curves of cyclic strength under different static deviator stresses

偏应力对孔压的影响并不如对应变的影响大。萧山原状软黏土在脉冲荷载作用下的孔压增长速率要快于对称正弦荷载作用下的孔压增长速率，这有别于砂土的动力特性[18]。

从上述分析可以看出，动应力幅值的增大和静偏应力的增大都可以加快变形的发展，而两者的综合作用就会出现动应力幅值小而静偏应力大时，变形的发展速度反而大的情况，所以不能单纯以动应力幅值的大小来判断变形的发展速度。这与黄茂松等的研究得到的结果一致[3]。

分别以 ε_{tp} 和 5%的双幅轴向应变为破坏标准，将达到该应变所需的振次和对应的动强度点绘成曲线，如图 10 所示。从中可以看出，静偏应力对动强度曲线的影响非常大，静偏应力越大动强度曲线越低，即相同动强度时达到破坏应变时所需的振次越少，而且曲线降低程度随着静偏应力的增大而增大。从图 10 还可以知道极限最小循环强度随着静偏应力的增大而减小，但静偏应力较小时，可以忽略它的影响，而直接采用对称正弦循环荷载的试验结果。

综上所述，循环应力的作用使得土体发生塑性变形累积，残余孔压逐渐发展，而静偏应力的存在加快了土体变形、孔压的发展，降低了动强度。所以相比于正弦荷载，在列车引起的动应力作用下，土体更容易达到破坏。

3 结论和建议

3.1 结论

根据列车引起的动应力的特点，设计了室内动三轴试验，研究萧山原状饱和软黏土的不排水循环剪切性状，根据试验结果，可以得到以下一些结论：

（1）静偏应力越大，塑性应变发展越快，破坏振次越小。且静偏应力越大，对变形的影响越显著。

（2）静偏应力越大，土体的残余孔压发展越快。

（3）静偏应力越大，动强度曲线越低，而且曲线降低程度随着静偏应力的增大而增大。

（4）极限最小循环强度随着静偏应力的增大而减小。但当静偏应力比较小时，可以忽略其对极限最小循环强度的影响。

（5）相比拉压对称循环荷载，列车引起的动应力作用下，地基土的变形和孔压均发展更快，更容易达到破坏状态。

3.2 建议

本文研究了交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土动力特性的影响并给出了部分试验结果，还应该从本构关系方面考虑对实验数据进行分析，建立考虑静偏应力的应变、孔压发展模型，并研究静偏应力对模型参数的影响，研究静偏应力对极限最小循环强度的定量影响。这也是笔者将要着手进行研究的方向。

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

另外交通荷载引起的动应力还具有多向振动、主应力轴连续旋转（主应力的方向和主应力差分量同时循环变化）等特点，应该利用室内试验模拟这些特性，对饱和软黏土在交通荷载作用下的动力特性作更详细的研究。

参考文献：

[1] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J]. 上海地质, 2000(2): 51－56. (CHEN Ji-wei, ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of Shanghai metro line No.1[J]. Shanghai Geology, 2000(2): 51－56. (in Chinese))

[2] 陈云敏, 陈仁朋, 芦　森. 软土地基地铁施工及运营过程中的几个土力学问题[C]//史佩栋. 城市地铁建设与环境岩土工程高级技术论坛论文集, 杭州, 2002: 165－177. (CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, LU Sen. Several soil mechanics problems in metro construction and operation on soft clay foundation[C]// SHI Pei-dong, ed. Proceedings of Seminar on Metro Construction and Environmental Geotechnical Engineering, Hangzhou, 2002: 165－177. (in Chinese))

[3] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏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-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2006, **28**(7): 891－895. (in Chinese))

[4] 陈颖平, 黄　博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1065－1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1065－1071. (in Chinese))

[5] 郭中华, 余湘娟, 严　蕴. 循环荷载作用下软土计算模型初探[J]. 河海大学学报, 2002, **30**(1): 109－112. (GUO Zhong-hua, YU Xiang-juan, YAN Yun. Discusssion on calculation model for soft soil under cyclic loading[J]. Journal of Hohai University. 2002, **30**(1): 109－112. (in Chinese))

[6] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(1): 33－46.

[7] 蒋　军, 陈龙珠. 长期循环荷载作用下黏土的一维沉降[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 366－369. (JIANG Jun, CHEN Long-zhu. One-dimensional settlement due to long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 366－369. (in Chinese))

[8] YASUHARA K. Undrained shear behaviour of quasi-overconsolidated clay induced by cyclic loading[C]// Proc IUTAM Symp, 1983: 17－24.

[9] FUJIWARA H, et al. Consolidation of alluvial clay under repeated loading[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(3): 19－30.

[10] 刘振纹, 秦崇仁, 王建华. 循环荷载作用下软黏土的累积变形特性的研究[J]. 水利水电技术, 2004, **11**(35): 14－17. (LIU Zhen-wen, QIN Chong-ren, WANG Jian-hua. Research on accumulative deformation behavior of soft clay under cyclic loads[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, **11**(35): 14－17. (in Chinese))

[11] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1996.

[12] WANG Chang-jing, CHEN Yun-min, WEN Shi-you. Train-induced cyclic loads in an elastic half-space[C]// Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2003: 361－368.

[13] 王常晶, 陈云敏. 列车荷载在地基中引起的应力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1178－1186. (WANG Chang-jing，CHEN Yun-min. Analysis of stresses in train-induced ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1178－1186. (in Chinese))

[14] CHEN Y M, WANG C J, CHEN Y P, et al. Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train[C]// Environmental Vibration Prediction, Monitoring and Evaluation, Okayama, 2005: 33－42.

[15] MADSHUS C, KAYNIA A M. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, **231**(3): 689－701.

[16] TAKEMIYA H. Lineside ground vibrations induced by high-speed train passage[C]// Workshop on Effect of High-speed Vibration on Structures and Equipment. Dep Civil Eng Nat Cheng Kung Univ, Tainan, Taiwan, 1998: 43－49.

[17] PROCTER D C, KHAFFAF J H. Cyclic triaxial tests on remoulded clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, **110**(10): 1431－1445.

[18] CAI Z Y. The Deformation behavior of sand[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press. 2004: 36－65.

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