

基于累积耗损能量的饱和粉土液化特性试验研究^①

周正龙¹, 陈国兴¹, 黄春霞¹, 陈树利²

(1.南京工业大学岩土工程研究所,江苏 南京 210009; 2.中海兴业武汉房地产有限公司,湖北 武汉 43005)

摘要:饱和粉土场地在强地震作用下易发生液化现象。开展饱和粉土的循环三轴试验,以循环加载的累积耗损能量为指标,探讨黏粒含量、密实度、有效围压和循环应力比等因素对粉土液化特性的影响,试验结果表明:粉土液化所需的耗损能量随黏粒含量的增加呈先减小后增大的趋势,当黏粒含量约为 8% 时粉土的液化耗损能量最低;液化耗损能量随粉土密实程度的增大而逐渐增加,并随初始有效围压的增长而增加,但粉土的液化耗损能量与循环应力比之间的关系不明显。

关键词:粉土液化;黏粒含量;密实度;初始有效围压;循环应力比;累积耗损能

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0001-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0001

Experimental Study of Liquefaction Characteristics of Saturated Silt Based on the Cumulative Dissipated Energy

ZHOU Zheng-long¹, CHEN Guo-xing¹, HUANG Chung-xia¹, CHEN Shu-li²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

2. China Oversea Xingye (Wuhan) Real Estate Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

Abstract: Liquefaction of saturated silty soil can easily occur during strong earthquakes. To investigate the liquefaction of a saturated silt mixture, a series of cyclic triaxial tests is conducted. Some factors such as clay particle content, relative density, effective confining stress, and cyclic stress ratio are examined by analyzing the cumulative dissipated energy for triggering liquefaction. The results show that for low (high) values of clay particle content, an increase in clay particle content with the same relative density leads to a decrease (increase) in cumulative dissipated energy. The effective confining pressure and relative density have strong effects on the cumulative dissipated energy. However, the cumulative dissipated energy is independent of the cyclic stress ratio for the specimens with constant relative density and confining pressure.

Key words: silt liquefaction; clay particle content; compactness; initial effective confining pressure; cyclic stress ratio; cumulative dissipated energy

0 引言

液化是造成场地地震破坏的主要原因之一。自 1964 年美国 Alaska 地震和日本新潟地震之后,关于饱和土液化问题的研究已经取得了丰硕的成果。粉土在我国分布广泛,许多建筑物、公路、铁路等都构筑在饱和粉土中,其性质与砂土有着较大差异^[1]。

在液化研究的早期,人们总是认为低塑性的粉土不易液化,直至 Appolonia 第一次考虑了粉粒和黏粒含量对动强度的影响^[2],特别是在几次地震后发生大面积粉土液化现象^[3],人们才逐渐意识到粉土液化研究的重要性。

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301);国家自然科学基金项目(41172258)

作者简介:周正龙(1988—),男,江苏海安人,博士研究生,主要从事土动力学研究。E-mail:zhouzhen.glong@163.com

通讯作者:陈国兴(1963—),男,浙江新昌人,博士,教授,主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail:gx6307@163.com

自 Nemat 和 Shookoh 于 1979 年发现了饱和砂土在循环荷载作用下的孔压与耗损能量之间的关系之后^[4],提出了基于能量法的土壤液化特性分析方法。和传统的应力或者应变分析方法相比,土壤液化所需的耗损能量与应力历史无关是能量法作为土壤液化研究的主要优势^[5-9]。Baziar 等^[10]通过动扭剪试验,利用能量法研究了砂土的液化特性,发现细粒含量和有效围压对砂土的液化特性有很大影响。Polito 等^[11]开展了不同波形的循环三轴试验,发现饱和松砂的液化耗损能量与加载波形没有关系。Chen 等^[12]基于循环三轴试验计算出的饱和砂土液化耗损能量,根据台湾集集地震钻孔资料,利用神经网络模型对现场土壤液化进行判别,成功率达到 91%。对于粉土,Polito 等^[13]通过循环三轴试验,验证了一个基于耗损能量的单参数孔压模型的适用性。沈杨^[14]利用能量法研究了不同动应力路径下粉土强度特性的差异,但基于能量法分析粉土液化特性的研究,至今鲜有报道。本文以循环加载的累积耗损能量为指标,通过饱和粉土的循环三轴试验,探讨黏粒含量、干密度、有效围压以及循环应力比等因素对粉土液化特性的影响。

1 理论基础

假定粉土试样单位体积内所累积耗散的能量为 W ,其增量为 dW ,对于循环荷载作用下的六面体土单元而言,则有:

$$dW = \sigma'_x d\epsilon_x + \sigma'_y d\epsilon_y + \sigma'_z d\epsilon_z + \tau_{xy} d\gamma_{xy} + \tau_{yz} d\gamma_{yz} + \tau_{zx} d\gamma_{zx} \quad (1)$$

式中, σ'_x 、 σ'_y 、 σ'_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的有效应力; $d\epsilon_x$ 、 $d\epsilon_y$ 、 $d\epsilon_z$ 分别为 x 、 y 、 z 方向上的轴向应变; τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 分别为垂直于 x 、 y 、 z 平面上的剪应力; $d\gamma_{xy}$ 、 $d\gamma_{yx}$ 、 $d\gamma_{yz}$ 则是垂直于 x 、 y 、 z 平面上的剪应变。

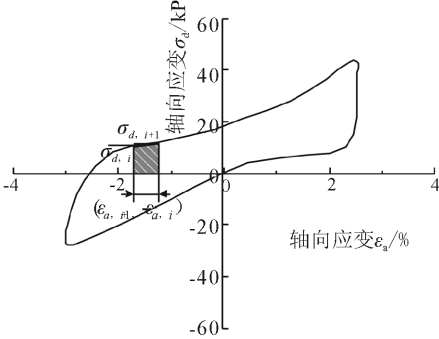


图 1 循环三轴试验中每周的耗损能量计算示意图

Fig.1 Calculation of weekly energy dissipation in cyclic triaxial test

在动三轴实验中,每次循环荷载作用下试样的耗损能量 W 等于每次记录的数据点形成的应力-应变关系滞回圈的面积(如图 1 所示),可利用梯形积分公式对式(1)进行积分计算获得,即为:

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i}) (\epsilon_{a,i+1} - \epsilon_{a,i}) \quad (2)$$

式中, n 是每次循环荷载作用下记录的数据点个数; $\sigma_{d,i+1}$ 、 $\sigma_{d,i}$ 分别是第 $i+1$ 和 i 个数据点记录的偏应力; $\epsilon_{a,i+1}$ 、 $\epsilon_{a,i}$ 则代表了第 $i+1$ 和 i 个数据点所记录的轴向应变。

2 试验概况

2.1 试样制备

所取粉土来自于南京某基坑,其基本物理参数见表 1。在所取粉土中掺入黏土来配置不同黏粒含量的粉土,配土的粒径分布见表 2。

表 1 粉土的基本物性指标

土粒比重	颗粒组成/%			塑性指数 IP
	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005	
2.69	40.7	54.9	4.4	6.5

表 2 配土的粒径分布及塑性指数

编号	颗粒组成/%			塑性指数 IP
	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005	
1	40.7	54.9	4.4	6.5
2	39.2	52.8	8	6.8
3	37.5	44.5	12	7.4

将粉土与黏土烘干后,碾成粉末状,过 0.25 mm 的筛,置于干燥的容器中。制样时控制配土试样的干密度,根据试样体积计算出其质量,按配土中的黏粒含量计算出该配制土样总的黏粒质量,再根据粉土和黏土中的黏粒计算出需要的粉土、黏土的质量。称量所需粉土及黏土的质量,充分混匀,加入适量的无气水,控制含水率在 20%左右,将其储存在密封的塑料袋内静置 24 h,再取袋内不同位置处的土测试其含水率,确保其差值不超过 0.2%。试验采用直径为 39.1 mm、高 80 mm 的试样,分 5 层捣实,根据土样的总质量确定每层土样的重量,击实到相应高度,将各层接触面刮毛,以保证上下层接触良好。

2.2 试验仪器及试验方法

试验所用仪器为南京工业大学岩土工程研究所自行研制的 DSZ-1 型应力控制动三轴仪^[15]。试验采用应力控制的方式,试验数据由计算机自动采集,试验记录下固结过程、振动孔压、动应力、动应变

的时程数据。

土样制备完成后,放入饱和器内抽真空饱和,在反映饱和度的 Skempton 孔压 B 值 ≥ 0.95 后进行固结,最后施加频率为 1 Hz 的轴向等幅正弦荷载。试验取孔压比达到 1 或者双幅轴向应变达到 5% 为初始液化标准^[16],当试样达到初始液化时试验停止。表 3 给出了试验时的黏粒含量、干密度 ρ_d 、有效围压 σ' 、施加的循环应力比 CSR、测得的初始液化循环周数 N_L 以及试样达到初始液化时的耗损能量 W 。

表 3 动三轴试验方案及结果

Table 3 Schemes and results of dynamic triaxial tests						
试验 编号	黏粒含 量/%	干密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有效围压 σ' /kPa	动应力 比 CSR	液化振 次 N_L	耗损能量 W /($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	4.4	1.39	50	0.312	72.3	26.18
2	4.4	1.39	50	0.504	17.3	27.24
3	4.4	1.39	100	0.231	95.6	55.23
4	4.4	1.39	100	0.272	41.3	59.64
5	4.4	1.39	100	0.349	35.2	56.8
6	4.4	1.39	150	0.241	67.7	89.2
7	4.4	1.39	150	0.294	48.3	90.4
8	4.4	1.39	150	0.355	26.5	86.1
9	4.4	1.50	50	0.361	152.5	31.87
10	4.4	1.50	50	0.442	42.3	32.34
11	4.4	1.59	50	0.453	99.3	38.83
12	8	1.39	50	0.281	52.3	21.47
13	8	1.39	50	0.361	23.4	22.92
14	8	1.39	50	0.425	14.5	22.33
15	8	1.39	100	0.156	108.4	46.27
16	8	1.39	100	0.277	35.3	43.72
17	8	1.39	100	0.329	28.2	45.65
18	8	1.39	150	0.315	106.3	68.17
19	8	1.39	150	0.355	28.4	72.44
20	8	1.50	50	0.409	33.3	26.6
21	8	1.50	50	0.544	18.5	27.98
22	12	1.39	50	0.250	78.3	34.52
23	12	1.39	50	0.383	26.5	36.65
24	12	1.39	100	0.248	63.6	68.23

3 试验结果与分析

图 2 以试样编号 No.2 的土样为例给出了典型粉土试样的试验结果。

该试样加载的循环应力比为 0.329,随着循环振次的增加,孔压逐渐递增,当振次达到 17.3 时,粉土达到了初始液化。图 2(a)给出了该试样试验过程中反映轴向应力与应变关系的滞回圈。从图中可以看出,割线模量随着循环振次的增加逐渐降低,而孔压则逐渐上升(如图 2(b))。单次循环振动耗损的能量和累积耗损能量记录在图 2(c)中,在试样达到初始液化的过程中,每次循环耗损能量的变化不大。图 2(d)给出了孔压比与累积耗损能量之间的关系,

孔压比在 0~0.65 之间时,孔压比随着累积耗损能量的增长呈线性增加关系,孔压比达到 0.65 后,孔压增长的速度变慢,并最终趋于 1。

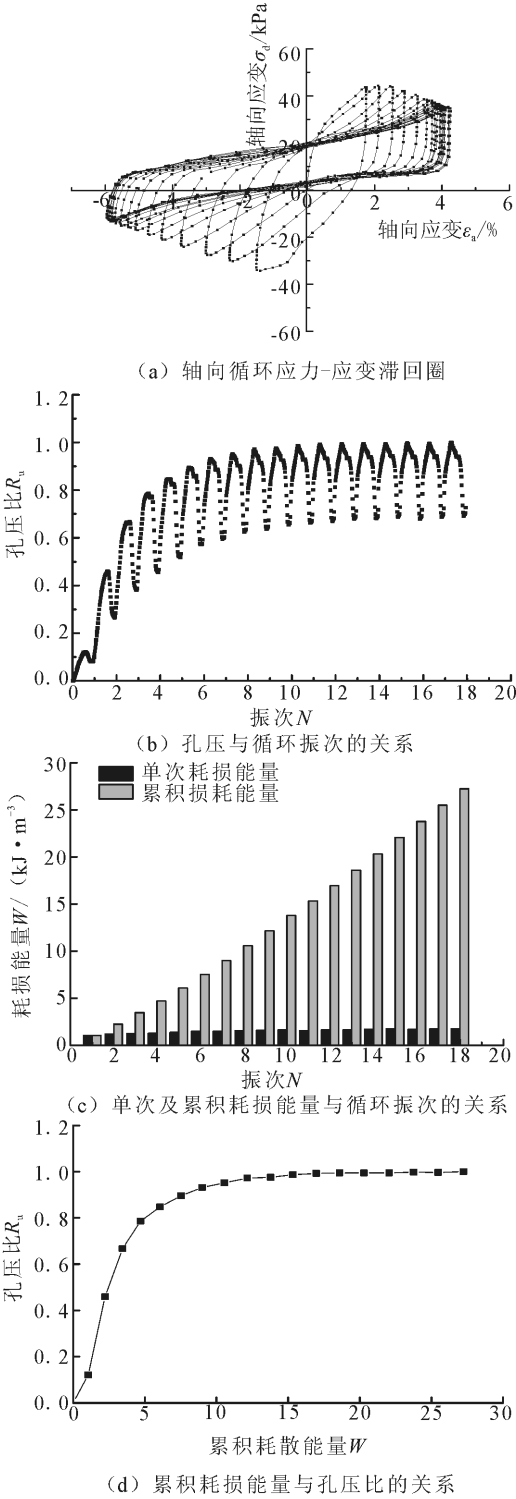


图 2 土样 No.2 的试验结果

Fig.2 Test result of soil sample No.2

3.1 黏粒含量对饱和粉土液化特性的影响

已有研究表明黏粒含量对粉土的液化特性影响

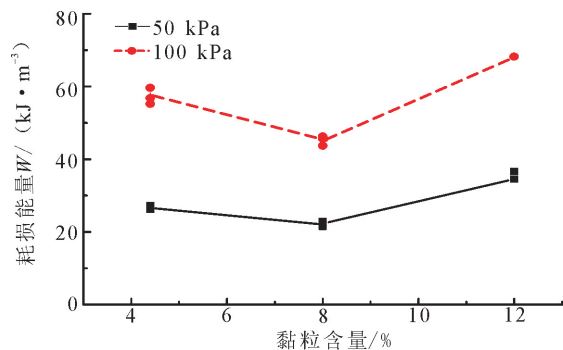


图3 黏粒含量与粉土液化耗损能量的关系

Fig.3 Relationship between clay content and energy dissipation in silt liquefaction

很大。图3给出黏粒含量与粉土液化耗损能量的关系。从图中可以看出,粉土中黏粒含量为8%时比4.4%、12%时的液化耗损能量要小得多,说明黏粒含量约为8%的粉土更易液化,这与文献[17]、[18]的动三轴试验结果相吻合。造成这种结果的原因可能是:当土中黏粒含量较低时,黏粒在土中主要起润滑作用,粉粒发生滑移所需的能量随黏粒含量的增加而减小;当黏粒含量较高时,黏粒与粉粒相胶结,主要起稳定、镶嵌作用,随着黏粒含量的增加,其对粉粒的胶结作用不断增强,粉粒发生滑移所需的能量则不断增加。

3.2 干密度对饱和粉土液化特性的影响

土的密实程度是影响粉土液化的另一个重要因素。图4给出了固结应力50 kPa时不同干密度与粉土液化耗损能量的关系。可以看出,密实度对粉土液化的影响十分显著,随密实度的增大,其所需的能量相应增加,抗液化能力也相应增强。这与以往的研究结果相符。

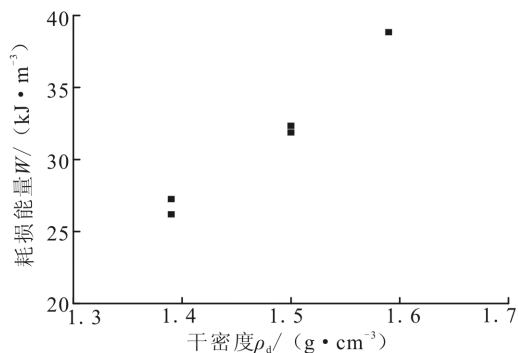


图4 干密度与粉土液化耗损能量的关系

Fig.4 Relationships between dry density and energy dissipation in silt liquefaction

3.3 有效围压对饱和粉土液化特性的影响

土的固结应力对粉土液化的影响亦不容忽视,

图5给出了黏粒含量为4.4%和8%的粉土液化耗损能量与有效围压的关系。可以看出,随着围压的增加,粉土液化耗损能量也相应增加,其抗液化能力得到了显著增强。Baziar等^[10]的研究表明,砂土液化耗损能量增加值与围压的增加值呈线性关系,即围压100 kPa时的砂土液化耗损能量是围压50 kPa时的两倍以上。在本次试验中,对于黏粒含量为4.4%和8%的粉土,围压100 kPa时的液化耗损能量约是围压50 kPa时的2倍,围压150 kPa时的液化耗损能量约是围压50 kPa时的3倍。

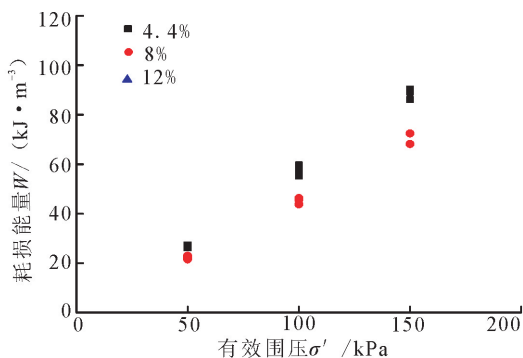


图5 不同有效围压作用下粉土液化耗损能量

Fig.5 Energy dissipation in silt liquefaction under different effective confining pressures

3.4 循环应力比对饱和粉土液化特性的影响

在其他试验条件相同的情况下,试验所施加的循环应力比越高,土壤越容易液化。图6给出了循环应力比与粉土液化耗损能量的关系。由图可知,对于给定的有效围压,加载不同循环应力比的粉土液化耗损能量相差不大,两者之间没有明显的关系,出现这种情况可能是因为粉土液化时的耗损能量只与土自身的物理性质有关,与施加外部荷载的方式无关。

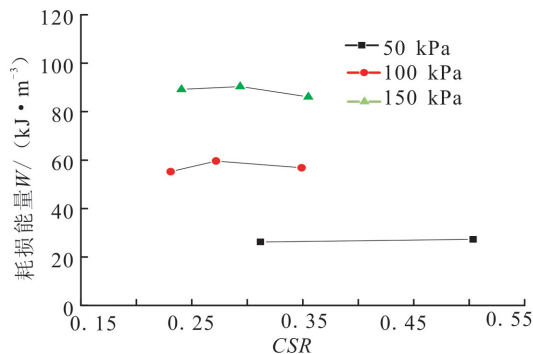


图6 循环应力比与粉土液化耗损能量的关系

Fig.6 Relationship between the cyclic stress ratio and energy dissipation in silt liquefaction

4 结论

本文以循环加载的累积耗损能量为指标,分析了粉土的液化特性,着重探讨了黏粒含量、密实度、有效围压、循环应力比等因素对粉土液化特性的影响,其主要结论为:

(1) 黏粒含量是影响粉土液化的重要因素,粉土的液化耗损能量随着黏粒含量的增加呈现出先减小后增大的规律,当黏粒含量为 8% 左右时粉土最易液化。

(2) 对于不同密实度和有效围压的粉土而言,粉土的液化耗损能量随密实度的增大而增大,随围压的增长而增大,饱和粉土的抗液化能力也随之增强。

(3) 粉土的液化耗损能量与所施加的循环应力比之间的关系不明显,这有待进一步试验研究与验证。

参考文献(References)

- [1] 黄博,陈云敏,殷建华,等.粉土和粉砂的动力特性试验研究[J].浙江大学学报:工学版,2002,36(2):143-147.
HUANG Bo, CHEN Yun-min, YIN Jian-hua, et al. Laboratory Study on Dynamic Properties of Silt and Silty Sand[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(2): 143-147. (in Chinese)
- [2] Appolonia D J, Appolonia E E, Brissette R F. Settlement of Spread Footings on Sand[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, 94(3): 735-760.
- [3] 周相国,邢贵发,苏玉国.天津地区饱和粉土地震液化的试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3813-3819.
ZHOU Xiang-guo, XING Gui-fa, SU Yu-guo. Experimental Study of Earthquake Liquefaction of Saturated Silt in Tianjin Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3813-3819. (in Chinese)
- [4] Nemat-Nasser S, Shokoh A. A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(4): 659-678.
- [5] Figueroa J L, Saada A S, Liang L, et al. Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(9): 1554-1569.
- [6] Green R A. Energy-based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [7] Baziar M H, Jafarian Y. Assessment of Liquefaction Triggering Using Strain Energy Concept and ANN Model: Capacity Energy[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(12): 1056-1072.
- [8] Park K, Kim S, Lee J, et al. Energy-based Evaluation of

- Excess Pore Pressure Using Damage Potential[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2008, 18(1).
- [9] Okur V, Ansal A. Evaluation of Cyclic Behavior of Fine-grained Soils Using the Energy Method[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(4): 601-619.
- [10] Baziar M H, Sharafi H. Assessment of Silty Sand Liquefaction Potential Using Hollow Torsional Tests-an Energy Approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 857-865.
- [11] Polito C P, Green R A, Dillon E, et al. Effect of Load Shape on Relationship Between Dissipated Energy and Residual Excess Pore Pressure Generation in Cyclic Triaxial Tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(11): 1118-1128.
- [12] Chen Y R, Chen J W, Hsieh S C, et al. Evaluation of Soil Liquefaction Potential Based on the Nonlinear Energy Dissipation Principles[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(1): 54-72.
- [13] Polito C P, Green R A, Lee J. Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(10): 1490-1500.
- [14] 沈扬,闫俊,张朋举,等.主应力方向变化路径下等压固结粉土强度特性差异和能量评价方法研究[J].岩土力学,2011,32(4):531-536.
SHEN Yang, YAN Jun, ZHANG Peng-ju, et al. Strength Characteristics of Isotropically Consolidated Silt Under Change of Principal Stress Orientation and Correlative Evaluation Method With Collapse Energy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 531-536. (in Chinese)
- [15] 陈国兴,朱定华,何启智.DS2-1 型动三轴试验机研制与性能试验[J].地震工程与工程振动,2002,22(6):71-74.
CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and Test of DS2-1 Cyclic Triaxial Testing System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(6): 71-74. (in Chinese)
- [16] 南京水利科学研究所.GBSL237-1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [17] 牛琪瑛,裴以惠,史美筠.粉土抗液化特性的试验研究[J].太原工业大学学报,1996,27(3):5-8.
NIU Qi-ying, QIU Yi-hui, SHI Mei-yun. The Study and Test of Liquefaction Resistant Characteristics of Silt[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1996, 27(3): 5-8. (in Chinese)
- [18] 刘雪珠,陈国兴.粘粒含量对南京粉细砂液化影响的试验研究[J].地震工程与工程振动,2003,23(3):150-155.
LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing. Experimental Study on Influence of Clay Particle Content on Liquefaction of Nanjing Fine Sand[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 150-155. (in Chinese)