

黏粒和砂粒混合土体的动态液化性能研究^①

唐小微, 李 涛, 马 玲, 张西文

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:现场和实验室观测表明,一定黏粒含量的砂土在一定条件下易发生动力液化的现象,且黏粒含量对砂土抗液化性能的影响较为复杂。通过 CKC 全数字闭环控制气动式三轴仪试验系统,对黏粒含量为 0%、5% 和 10% 的砂土进行动力三轴试验。结果表明,黏粒含量为 5% 时砂土的抗液化性能最差,并且黏粒含量对于孔压的发展具有较大影响。根据实验数据的分析,对砂土—黏土的混合土的液化和抗液化性能进行机理分析。

关键词:黏粒含量; 抗液化; 动三轴试验; 循环应力比

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0006-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0006

Dynamic Liquefaction Properties of Sand-Clay Mixture

TANG Xiao-wei, LI Tao, MA Ling, ZHANG Xi-wen

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Field observations and laboratory studies indicate that sand with a certain amount clay can be easily dynamically liquefied under certain conditions and that the amount of clay has a complex impact on the liquefaction resistance of sand. Using a CKC dynamic tri-axial test system, the liquefaction resistance of sand samples with different clay content (0%, 5%, and 10%) was investigated. The results show that the sand sample with 5% clay had the lowest liquefaction resistance; the generation of pore water pressure is obviously effected by the clay content. The liquefaction mechanism of the sand-clay mixture is explained according to the experimental results.

Key words: clay content; anti-liquefaction; dynamic tri-axial test; cyclic stress ratio

0 引言

我国山多、地震频发,是世界上发生滑坡灾害较多的国家之一。近年来,随着我国经济的快速发展,在实际工程中出现了大量的人工边坡。但这些边坡中的土体通常并不是纯砂,而是砂粒、粉粒和黏粒组成的混合物,其中粉粒和黏粒又统称为细粒^[1]。研究表明,含一定细粒量的砂土在某些条件下都有类似于松砂液化的性质。而含细粒砂土的抗液化性能主要取决于细粒的含量及其物理性质,从细粒含量的角度考虑时,因粉粒和砂粒性质比较接近,可认为

土的抗液化性能主要受黏粒含量的影响。因此,常将黏粒含量作为特征指标引入相应的研究^[2]。对地震和其他动荷载作用下含细粒边坡的动力液化问题进行研究,以探讨边坡的稳定性,对滑坡灾害的预报和防治具有非常重要的现实意义。

对于液化的定义,存在多种解释。1978 年美国岩土工程学会将其定义为^[3]，“任何物质转化为液体的过程”。汪闻韶^[4]对于无黏性土液化的解释是“任何物质由固体状态变为液体状态的转化过程”。土体液化主要在饱和无黏性土或稍具黏性的土中发

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(5107806);“九七三”国家重点基础研究发展计划项目(NO.2012CB013605-2)

作者简介:唐小微(1968—)男,河北唐山人,博士,副教授,博士生导师,主要从事岩土地震工程等方面的教学和科研.E-mail: tangxw@dlut.edu.cn

作者简介:李 涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事岩土工程数值及试验方面的研究.E-mail: 476693724@qq.com

生,砂土在承受了动力荷载作用下,将会发生动力液化。关于动力液化有多种不同的定义,例如初始液化^[5]和循环液化^[6]等定义。

在液化评价标准上大体上有两种:Seed 等提出的循环活动性准则以及 Casagrande 提出的临界孔隙比准则。循环活动性准则是从应力状态角度出发的,提出在循环荷载的持续作用下,土中法向有效应力为零这个状态会不断出现,直至土体累积变形超过允许的变形失稳条件。临界孔隙比从位移角度出发,指出土体产生大的变形或应变是致使结构物破坏的主要原因,该观点以 Castro^[7],Roberston^[8] 等为代表。

我国岩土工程界多采用循环活动性标准,来判断是否发生液化。但是由于某些土体的孔压在动荷载的作用下不能达到围压,且当孔压达到围压时三轴试样的轴向应变常为 5%,所以可取试样的动应变达到 5%作为液化的标准。

关于细粒含量对砂土液化特性的影响,国内外学者做了大量工作。以 Lade^[9]、Kuerbis^[10] 等为代表提出随细粒含量的增加,饱和砂土的抗液化能力会降低;而 Chang 等^[11] 研究却发现随着细粒含量的增加,饱和砂土的抗液化能力会提高;衡朝阳等^[12] 研究指出,含黏粒砂土的动剪应力比与黏粒含量的关系呈下凹抛物线型;曾长女等^[13] 研究发现黏粒含量对于粉土液化的影响与其液化后的大变形规律之间存在着内在联系。虽然目前关于细粒含量对砂土液化特性的影响有很多结论,但普遍认为细粒含量对于砂土抗液化性能的影响并不是单调的。本文通过 CKC 三轴仪对不同黏粒含量的砂土进行试验,得出试样的轴向应变、动孔压比、循环应力比与试样破坏时的循环振次的关系曲线。

1 试验概况

1.1 试验设备

本文试验采用 1982 年由美国加州大学戴维斯分校研制的 CKC 全数字闭环控制气动式三轴仪(简称 CKC 三轴仪)。它是世界上第一台数控全自动的三轴仪,测量精度高、加载方式多样化,是研究土体静力和动力特性的理想设备。该仪器主要由电脑、信号转换系统、电子-气动转换器、气动加载系统、三轴围压室和测量传感器等部分组成。它具有多种功能,可进行等向与非等向固结试验、三轴压缩和拉伸试验、 k_0 线性固结试验、动力三轴试验、等 p 循环剪切试验、蠕变试验和任意应力路径试验等。

1.2 土样制备

本次试验中各种黏粒含量试样所用的砂为经过粒径筛选($d_{\max}<0.5\text{ mm}$)的福建标准砂,其基本物理参数见表 1。

表 1 试验用砂的基本物理参数

Table 1 The basic physical properties of the sand used in test

G_s	$\rho_{\text{dmin}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{dmax}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	d_{50}/mm	C_c	C_u	级配情况
2.627	1.35	1.66	0.17	0.8	1.9	不良

通过颗粒分析可获得其级配曲线,如图 1 所示。掺入砂中的黏粒为含 Na 基的商用膨润土。

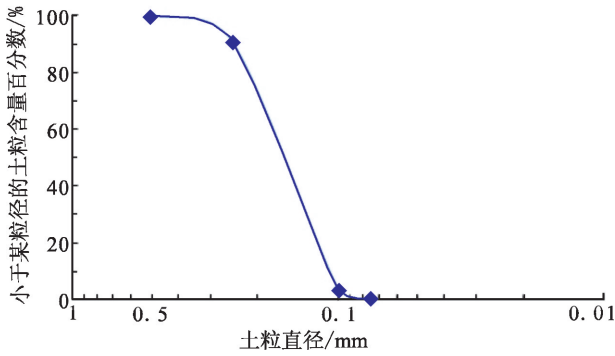


图 1 试验用砂的颗粒级配曲线($d_{\max}<0.5\text{ mm}$)

Fig.1 The particle grading curve for the test sand($d_{\max}<0.5\text{ mm}$)

试验中所用试样的尺寸为 $39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ (直径 $\times$ 高度),黏粒含量分别为 0%、5%和 10%。0%黏粒含量的试样又称为纯砂试样。所有试样都是饱和和重塑样,初始相对密实度采用 20%,采用湿击法进行制样。黏粒含量为 0%和 5%的试样由于渗透系数比较高,在制好样之后直接在仪器上进行饱和;黏粒含量为 10%的试样,由于渗透性较低则采用真空饱和法。试样饱和完成后,测孔隙水压力系数 B ,若达到 95%以上,认为试样饱和;若不足,则对试样继续进行饱和。试样的制备、装样、饱和、固结和剪切等具体步骤参照《SL 237-1999 土工试验规程》^[14]。试验中采用应力控制的方式进行加载,施加等幅半正弦波形式的动荷载,当达到 1 000 个循环后即停止试验,振动频率 $f=0.5\text{ Hz}$,动荷载周期 $T=2\text{ s}$ 。

1.3 破坏标准

破坏标准的选取对于讨论循环动力液化问题显得非常重要。土样破坏的标准包括:初始液化标准、应变标准以及极限平衡标准等。根据经验表明,土样中黏粒含量较少或粗颗粒较大时,易达到完全液化;土样中黏粒含量较大或粗颗粒较小时,尽管土样

已产生足够的变形,但动孔隙水压力也不高。针对以上情形并结合试验设计方案,对动力三轴试验采用应变标准;选取轴向应变 $\epsilon_f = 5\%$ 为破坏标准^[14]。

2 试验结果与分析

为探究黏粒含量对砂土动力液化的影响,采用CKC动三轴仪进行试验。图2~4列出了黏粒含量为0%、5%和10%的 ϵ_a - N 曲线以及 u/σ_3 - N 曲线,其中 N 为各黏粒含量试样在试验中的循环振次。

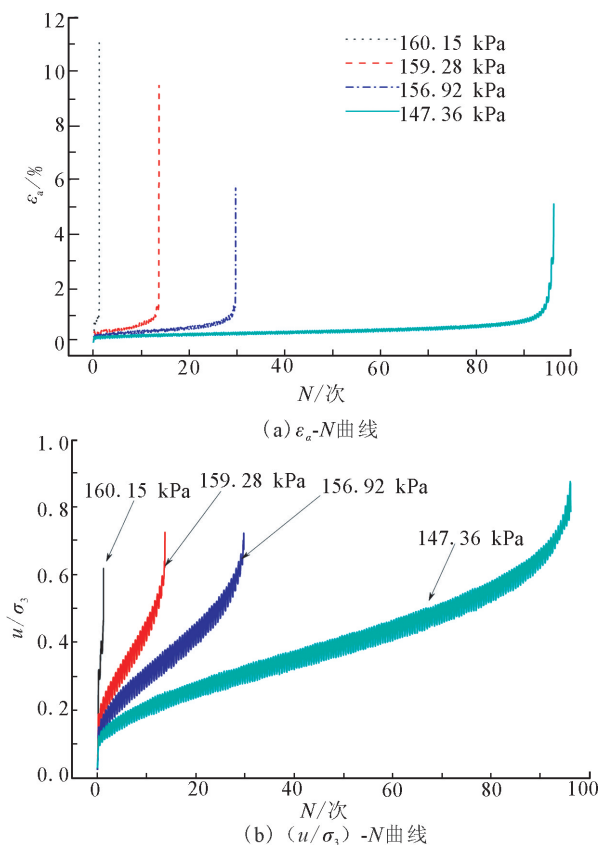


图2 $P_c = 0\%$ 的试验结果

Fig.2 Results of test ($P_c = 0\%$)

从图2(a)可以看到,纯砂试样($P_c = 0\%$)在达到破坏时($\epsilon_a = 5\%$),各个荷载幅值作用下试样破坏的循环振次差别较大。当荷载幅值为160.15 kPa时试样几乎瞬间就破坏;而当荷载幅值为147.36 kPa时,试样破坏时所需的循环振次接近95次。而从图2(b)中可以看到纯砂试样在破坏时,动孔压比平均都维持在0.75左右,而且上升速率很快,说明液化比较剧烈。

从图3(a)可以看到,黏粒含量 $P_c = 5\%$ 的试样在破坏时,动荷载幅值普遍低于纯砂,并且破坏时的循环振次也较纯砂有所减少;而从图3(b)中可以发现,试样破坏时的动孔压比大多数都达到了0.9,普

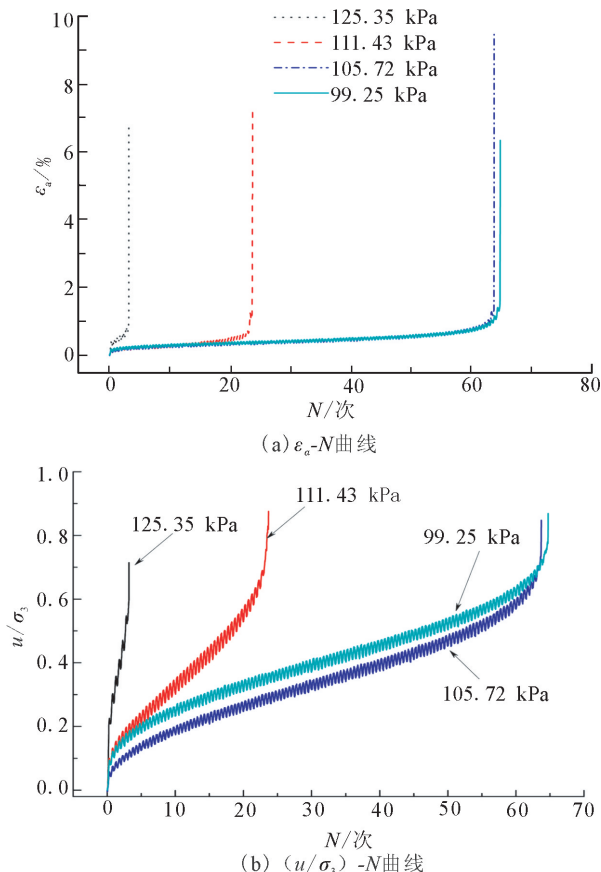


图3 $P_c = 5\%$ 的试验结果

Fig.3 Results of test ($P_c = 5\%$)

遍高于纯砂。由此可以说明,黏粒含量 $P_c = 5\%$ 的试样在动荷载作用下液化现象比纯砂更为剧烈。

从图4(a)可以观察到,黏粒含量 $P_c = 10\%$ 的试样在破坏时的动荷载幅值又普遍高于黏粒含量 $P_c = 5\%$ 的试样,且稍高于纯砂试样的。而从图4(b)中可以发现,试样破坏时的动孔压比相当低。当荷载幅值为166.65 kPa时试样破坏时的动孔压比最大,但也只有0.04左右;当荷载幅值为184.6 kPa时试样在破坏时的动孔压几乎没有发展。从以上分析可以看出,此时的黏粒对于孔压的发展起到了一个明显的抑制作用。说明黏粒含量 $P_c = 10\%$ 的试样的抗液化性能比 $P_c = 5\%$ 的试样高。

为了将黏粒含量对砂土动力液化的影响规律更加直观地表现出来,将3种黏粒含量试样发生液化时所需的循环应力比CSR和相应的循环振次 N 绘制于图5中,并用线性拟合的方法对相同黏粒含量的试验点进行拟合,得到CSR- N 曲线。其中循环应力比CSR^[15]的定义为:

$$CSR = \sigma_d / 2\sigma_3 \quad (1)$$

式中: σ_d 为循环动应力, kPa; σ_3 为试样的固结围

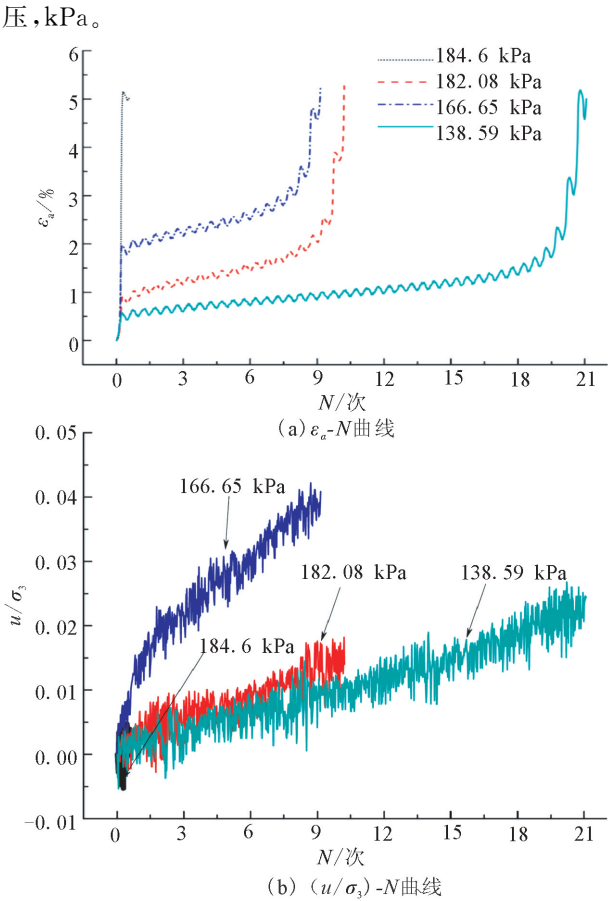


图 4 $P_c=10\%$ 的试验结果
Fig.4 Results of test ($P_c=10\%$)

从图 5 中可以看出,纯砂的拟合直线位于 5% 和 10% 黏粒含量的拟合直线之间,且 5% 黏粒含量的拟合直线处于最下端。从上述分析可以得出:动力试验中 5% 黏粒含量的砂土抗液化能力最差。可说明,黏粒含量对砂土动力液化的影响并非是单调的,而是存在某个界限黏粒含量值使得砂土的抗液化性能最差。当黏粒含量小于此界限值时,随着黏粒含量的增加,黏粒的存在将促使孔压的发展,进而使得砂土的有效应力下降,最终导致砂土的抗液化性能下降;大于该界限值时,随着黏粒含量的增加,黏粒的存在将抑制孔压的发展,此时黏粒的存在反而使得砂土的抗液化性能增强。

该结论还可通过结合图 6 中试样的初始孔隙比,从颗粒的细观角度对液化进行解释。含黏粒的砂土,其颗粒间的相对稳定性会因黏粒的存在而发生变化,这是因为黏粒无法完全占据砂粒间的空隙,而是以点接触的形式分布在砂颗粒周围,对砂粒起胶结作用。当黏粒含量较低时,黏粒对砂颗粒主要起润滑作用,这种润滑作用使得砂颗粒在受外力时

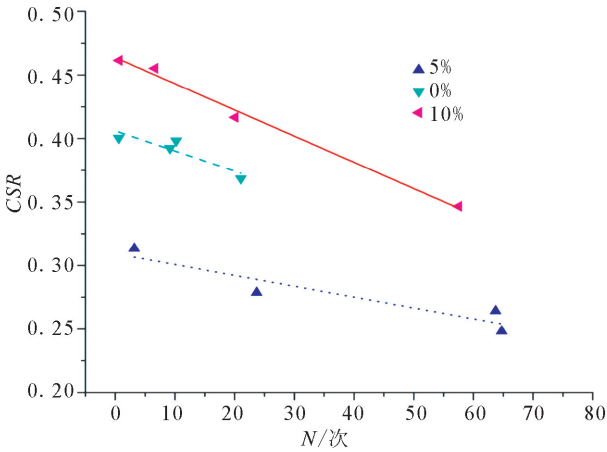


图 5 黏粒含量对砂土循环抗液化的影响
Fig.5 Influence of clay content on cyclic anti-liquefaction of sand

将沿黏粒方向发生滑动,直至粒间结构达到一个稳定状态。这将导致粒间空隙减小,孔隙水压力上升,抗剪强度下降,最终发生液化。

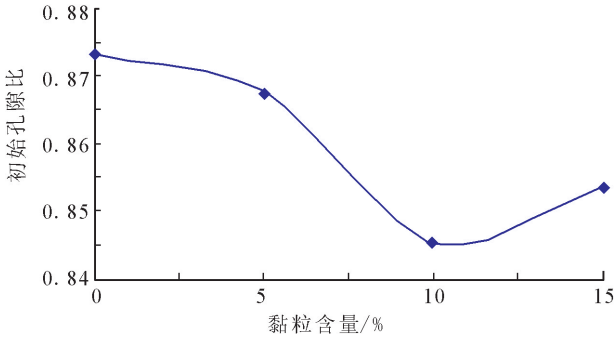


图 6 含黏粒试样的初始孔隙比
Fig.6 Curve of the initial void ratio of clayed sample

从图 6 中可以看到,在低黏粒含量下,随黏粒含量的增加,试样的初始孔隙比呈现出下降的趋势。当发生剪切时,低黏粒含量试样的孔压积聚效应非常明显,所以液化现象比纯砂更剧烈。当黏粒含量增加至某一值时,黏粒对砂颗粒主要起稳固作用,这是由于随着黏粒含量的增大,黏粒包裹在砂粒周围,形成一层足够厚的黏粒层。黏粒一方面胶结砂粒,另一方面调整自身结构,在整体上则表现出稳固砂粒的作用。此时随着黏粒含量的增加,砂土逐渐向黏土过渡。相同质量的黏土和砂土,前者孔隙比较后者更大,所以此时试样的初始孔隙比呈现出回升趋势,孔压的积聚效果减弱,试样抗剪强度增强,液化受到抑制。

3 结论

本文以含一定量黏粒的砂土为研究对象,进行

了室内动三轴试验,重点研究了黏粒含量对砂土抗液化的影响规律,最后可得出以下结论:

(1) 黏粒的存在对砂土的抗液化特性有着重要影响。黏粒含量较小时(如 5%),黏粒将促使孔压的发展,使砂土的抗液化性能下降,因而比纯砂更易发生动力液化现象;而当黏粒含量较大时(如 10%),黏粒会抑制孔压的发展,提高砂土的抗液化性能,因此不易发生动力液化现象。所以可得出,在循环动力作用下黏粒含量对砂土抗液化的影响规律呈向上开口的近似抛物线型,当黏粒含量小于某一值时,砂土的抗液化性能随着黏粒含量的增加而降低;而当黏粒含量大于某一值时,砂土的抗液化性能随着黏粒含量的增加而增强。

(2) 黏粒含量对砂土抗液化的影响规律可以从细观层面进行解释。当黏粒含量较小时,黏粒对砂粒进行胶结,黏粒主要起润滑作用;当黏粒含量较大时,一方面黏粒胶结砂粒,另一方面调整自身结构,在整体上黏粒表现出稳定和镶嵌砂粒的作用,这时土体表现出黏土的性质,抗剪强度增大,抗液化能力增强,因此不易发生液化。

参考文献(References)

- [1] 郭莹,郭承侃,陆尚漠.土力学[M].大连:大连理工大学出版社,2003.
GUO Ying, GUO Cheng-kan, CHEN Shang-mo. Soil Mechanics [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 谢定义.动荷载下土的强度特性[J].水利学报,1987(12):17-32.
XIE Ding-yi. Strength Characteristics of Soils under Dynamic Loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(12): 17-32. (in Chinese)
- [3] The Committee on Soil Dynamics of the Geotechnical Engineering Division. Definition of Terms Related to Liquefaction [J]. JGED ASCE, 1978, 104, (9): 1197-1200.
- [4] 汪闻韶.土的液化机理[J].水利学报,1981(5):22-34.
WANG Wen-shao. Mechanism of Soil Liquefaction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981(5): 22-34. (in Chinese)
- [5] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading[C]//Proc ASCE J AMFD. 1966, 92 (SM6): 105-134.
- [6] 赵成刚,尤昌龙.饱和砂土液化与稳态强度[J].土木工程学报,2001,34(3):90-96.
ZHAO Cheng-gang, LONG Chang-long. Liquefaction and Steady State Strength [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 90-96. (in Chinese)
- [7] Castro G, Poulos S J. Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(6): 501-506.
- [8] Robertson P K, Woeller D J, Finn W D L. Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(4): 686-695.
- [9] Lade P V, Yamamuro J A. Effects of Nonplastic Fines on Static Liquefaction of Sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 918-928.
- [10] Kuerbis R, Nequessey D, Vaid Y P. Effect of Gradation and Fines Content on the Undrained Response of Sand[C]//Hydraulic Fill Structures, Geotechnical Special Publication, ASCE. 1988, 21: 330-345.
- [11] Chang N Y, Yeh S T, Kaufman L P. Liquefaction Potential of Clean and Silty Sands[C]//Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conferen. Seattle: USA, 1982: 1017-1032.
- [12] 衡朝阳,何满潮,裘以惠.含粘粒砂土抗液化性能的试验研究[J].工程地质学报,2001,9(4):339-344.
HENG Chao-yang, HE Man-chao, QIU Yi-hui. Experimental Study of Liquefaction-resistant Characteristics of Clayed Sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 339-344. (in Chinese)
- [13] 曾长女,冯伟娜.黏粒含量对粉土液化后特性影响的试验研究[J].地震工程学报,2014,36(3):727-733.
ZENG Chang-nv, FENG Wei-na. Influence of Clay Content on Post-liquefaction Characteristics of Silt [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 727-733. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组.土工试验规程(SL237-1999)[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specification of Soil Test (SL237-1999) [S]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese)
- [15] Gratchev I B, Sassa K, Osipov V I, et al. The Liquefaction of Clayey Soils Under Cyclic Loading [J]. Engineering Geology, 2006, 86(1): 70-84.