

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.002

余湘娟, 吴克雄, 高磊. 某尾矿库坝基粉砂动力特性试验[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 11-16. (YU Xiang-juan, WU Ke-xiong, GAO Lei. Experimental studies on dynamic characteristics of silty sand for tailing dam foundation [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 11-16.)

某尾矿库坝基粉砂动力特性试验

余湘娟^{1,2}, 吴克雄^{1,2}, 高磊^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:通过对某尾矿库坝基粉砂进行共振柱和动三轴试验,得到动力特性参数的归一化曲线。分析变形特性与强度特性得到粉砂动力参数的变化规律。由动三轴试验得到不同固结比和固结压力下粉砂动强度、动孔压比与振次的关系,发现动强度与破坏振次间符合乘幂关系,可用幂函数来拟合;动孔压比与振次的关系可用指数函数进行拟合。采用 Hardin-Drnevich 双曲线模型与 Davidenkov 模型对动剪切模量比进行拟合,试验分析结果表明,随着围压的增加,两种模型的拟合效果均有所改善。同一围压下, Davidenkov 模型拟合效果优于 Hardin-Drnevich 双曲线模型。

关键词:粉砂; 动剪切模量; 共振柱试验; 动三轴试验; 动强度; Davidenkov 模型; Hardin-Drnevich 模型
中图分类号: TV649; TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0011-06

尾矿库是堆存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出的尾矿或其他工业废渣的场所,是具有高势能的人造泥石流危险源,存在溃坝危险,一旦失事,容易造成重特大事故。粉砂是工程性质较为特殊的土类,在强烈振动下,饱和粉砂易发生液化,引起地面喷砂、地基不均匀沉降、道路滑移和滑坡等震害,所以需对粉砂进行抗震液化分析^[1-6]。李男等^[7]研究了等向固结条件下饱和福建标准松砂在循环斜椭圆、圆形、扭剪、三轴路径下的动力特性,研究表明:土体循环孔压发展有陡升型和陡降型两种模式,不同路径下孔压增长速率不同,其中圆形路径最快,循环扭剪最小;傅华等^[8]对不同掺量胶凝材料进行静动力三轴试验,研究其力学和变形特性;周金领等^[9]对某核电厂取水明渠导流堤地基土粉砂层进行室内共振柱试验和动三轴液化试验,分析了粉砂的动力变形曲线,探讨了砂土的抗液化强度与液化振次间的关系。

动剪切模量作为土体重要动力参数之一,目前对动剪切模型进行拟合的模型比较经典的有 Hardin-Drnevich 双曲线模型和 Davidenkov 模型。李永强等^[10]通过对土体动剪切模量的联合测定,研究了两种不同拟合方法的拟合效果,通过对拟合参数的比较来判断模型的优劣程度。张明等^[11]提出了基于 Davidenkov 模型和新阻尼比的计算模型。经过验证新模型具有较好的可靠性和实用性。彭盛恩等^[12]选择统一的模型对黏土、砂土、淤泥质土及岩石的试验数据进行了回归分析,得到了不同土的回归方程。庄海洋等^[13]基于 Davidenkov 模型曲线,采用破坏剪应变上限值作为分界点,修正了 Davidenkov 模型曲线。

本文结合某尾矿坝工程,针对坝基粉砂开展粉砂的动力特性试验研究,通过粉砂的室内共振柱试验及动三轴试验,获得粉砂的动强度指标,为尾矿库的动力计算提供必要参数,并使用 Hardin-Drnevich 双曲线模型和 Davidenkov 模型对粉砂的动剪切模量与剪应变的关系进行拟合,分析两种模型对于粉砂的拟合效果。

收稿日期: 2015-07-08

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2012M511193,2014T70468);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130832);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B15020060)

作者简介: 余湘娟(1957—),女,浙江黄岩人,教授,博士,主要从事土动力学研究。E-mail: xjyu@hhu.edu.cn

1 试验材料与仪器

根据基础试验判定该试验用土为粉砂,取自云南某尾矿库坝体,两种试验需要进行3组平行试验,共振柱试验每组需要1个试样,得到围压在50,100,200,300 kPa时的动剪切模量和阻尼比等参数,动三轴试验每组需要3个试样,分别得到围压在100,200,300 kPa时的动剪应力和振动周期等参数,共振柱试样:直径50 mm,高100 mm,动三轴试样:直径39 mm,高80 mm。采用击样法制备重塑样,根据不同的试验制作成相应尺寸的圆柱形试样,分5层击实成型,用抽气饱和法对试样进行饱和,确保饱和度达到95%以上,粉砂控制干密度为 1.65 g/cm^3 ,含水率为23.4%,孔隙比为0.692。土样颗分曲线见图1。

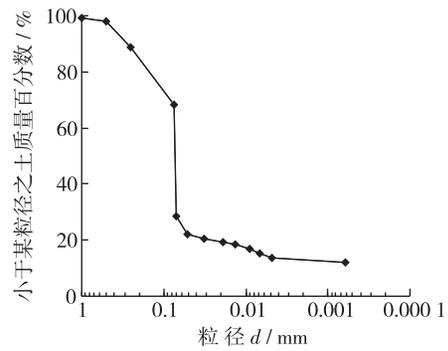


图1 粉砂颗分曲线

Fig. 1 Gradation curve of silt

粉砂的剪切模量与阻尼比在剪应变 $\gamma < 10^{-4}$ 时用共振柱三轴仪测试,具体步骤为:用橡皮膜包扎安装在压力室内施加周围压力和轴向压力,使试样在预定压力下(50,100,200,300 kPa)固结,固结应力比 $k_c = 1.0$,制样时控制含水率在8%左右;在试样顶端施加扭转的谐振激振力,调节激振频率使试样顶端的振幅达到最大值,此时试样系统发生共振,测得共振频率 f_n ;进而可计算出剪切模量和阻尼比。

在进行液化判别时,需要有粉砂在不同固结压力下的抗液化剪应力与振动周数的关系曲线,此关系曲线由动三轴试验得到。在周围压力和作用下固结,在不排水条件下施加轴向激振力,3种土试样的固结应力比 $k_c = \sigma_1 / \sigma_3$ 为1.0,1.5和2.0,固结围压 σ_3 分别为100,200和300 kPa。试样在周期剪切时以轴向周期应变($k_c = 1.0$)或残余应变($k_c = 1.5, 2.0$)达到5%作为破坏标准。在各向等压情况下破坏时孔隙压力已等于周围压力,试样发生液化,有效应力降低为零。

2 试验结果

2.1 粉砂的动力变形特性

动剪切模量和动阻尼比是土的重要动力参数,是土层地震反应分析中必备的动力参数。通过对粉砂进行动力特性试验,得到粉砂在动力作用下的变形数据,将试验数据进行归一化处理得关系曲线见图2。图2(a)中 σ_0 为初始平均应力, $\sigma_0 = (1 + 2K_0)\sigma_v / 3$, K_0 为静止侧压力系数,取 $K_0 = 0.7$, σ_v 为竖向压力。从图2(b),(c)可看出剪切模量、阻尼比与剪应变关系曲线有很好的规律性;不同围压(50,100,200,300 kPa)下粉砂的初始剪切模量分别为35.07,46.09,58.27,81.66 MPa,最大阻尼比为0.30。

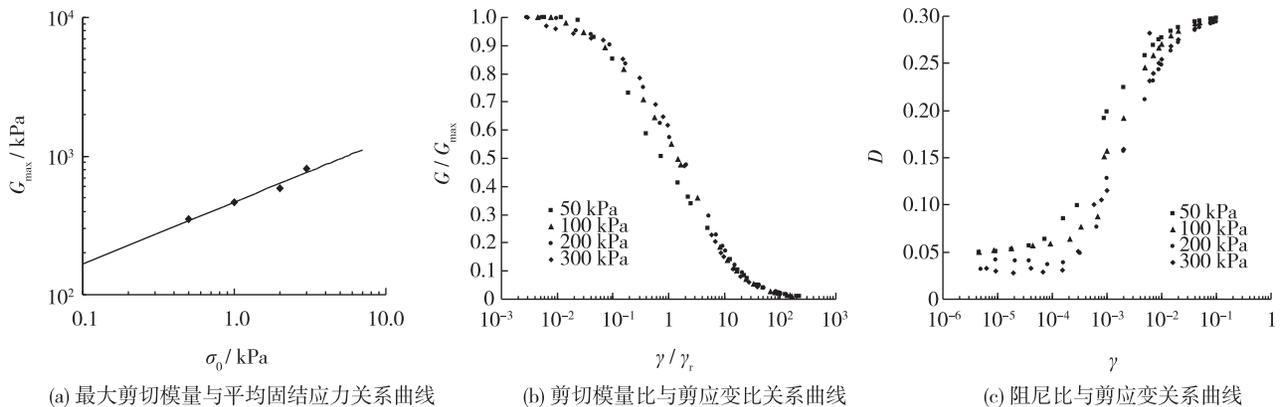


图2 试验曲线的归一化处理

Fig. 2 Normalization processing for test curves

2.2 粉砂的动力强度特性

图 3 是重塑粉砂土样在固结应力比分别为 $k_c = 1.0, 1.5, 2.0$ 时不同固结应力下的动强度与振次的关系曲线, 可看出曲线有较好的规律性, 动强度随着振次的增加而降低, 且两者有较好的乘幂函数关系, 可用幂函数来拟合。从图 3 中还可初步判断出在同一固结应力比时, 动强度随着围压的增大而增大, 在围压相同时, 动强度随着固结应力比的增大而增大(见图 4)。

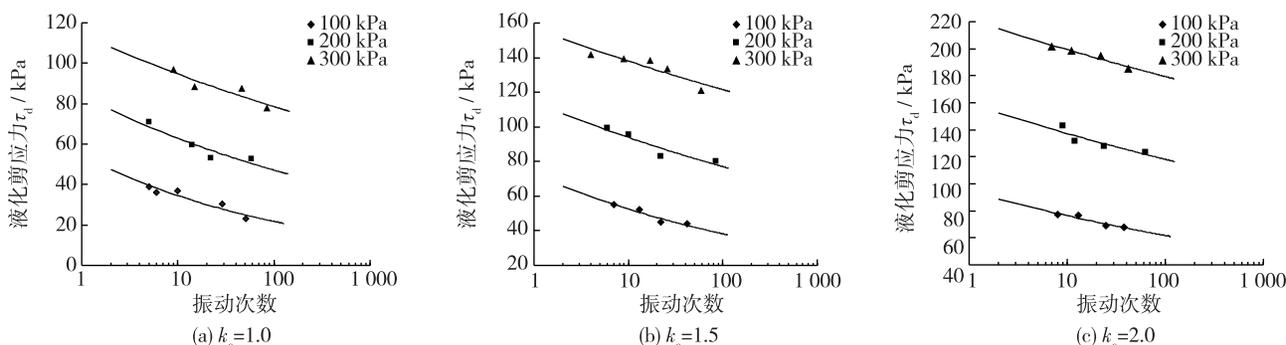


图 3 不同固结应力比时抗液化剪应力与破坏振次关系

Fig. 3 Curves of anti liquefaction shear stress and failure vibration times with different consolidation stress ratios

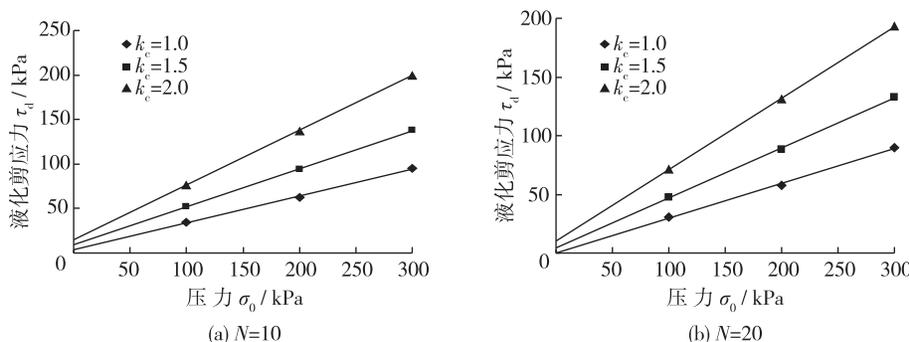


图 4 强度与固结压力 σ_0 关系

Fig. 4 Relationships between strength and consolidation pressure

2.3 粉砂的动孔隙水压力特性

动荷作用下孔隙水压力的发展是土体变形强度变化的根本因素, 孔压值可作为砂土是否发生液化的依据。对动孔压发生, 发展到消散的研究是热点。目前, 常用孔压的应力模型, 而动应力的的大小从应力幅值与持时两方面来反映, 所以模型常出现动应力和振次。这类模型大多用指数函数拟合, 根据本次试验数据得到的动孔压与振次关系如图 5, 可见, 试验数据能较好地符合指数函数形式, 通过拟合可得到相关参数。

3 模型拟合对比

3.1 拟合模型

本文采用 Hardin-Drnevich 双曲线模型和 Davidenkov 模型进行动剪切模量拟合。Hardin-Drnevich 双曲线

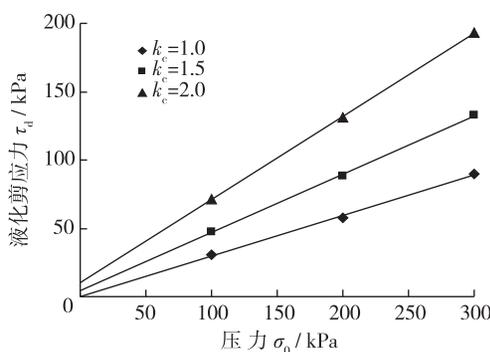


图 5 动孔隙水压力比与振次关系

Fig. 5 Relationships between dynamic pore water pressure ratio and vibration times

模型为:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \gamma_d \gamma_r}$$

Davidenkov 模型为:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = 1 - \left[\frac{(\gamma_d/\gamma)^{2B}}{1 + (\gamma_d/\gamma)^{2B}} \right]$$

其中: G_d 为动剪切模量; G_{dmax} 为最大动剪切模量; γ_d 为动剪应变, γ_r 为参考剪应变,可当作拟合参数由拟合得到; γ, A, B 均为相关参数,由拟合得到。

3.2 拟合结果及分析

用 Hardin-Drnevich 模型和 Davidenkov 模型对试验数据进行拟合,从图 6 可看出:剪应变较小(小于 10^{-5})时,试验值离 Davidenkov 模型曲线较近,随着剪应变增大($10^{-5} \sim 10^{-2}$),试验值离 Hardin-Drnevich 模型曲线较近,当剪应变继续增大,试验值开始偏离 Davidenkov 模型曲线。说明在较小应变和较大应变时,Hardin-Drnevich 模型有更好的拟合效果,而在中间大部分应变情况下,采用 Davidenkov 模型有更好的拟合效果。两种模型拟合结果的 R_{cs}, R_{ss} 值都减小且越来越接近 0,而 R_{Adj}^2 则增大且越来越接近 1,说明随着围压增加,两种模型拟合效果越来越好。因为随着围压增大,土体越来越密实,土颗粒间的连接更加紧密,可发生的剪切位移受到限制,土体性质更趋于稳定,试验得到的数据较低围压更有规律性,故高围压下测得的试验数据与模型拟合结果更加吻合。

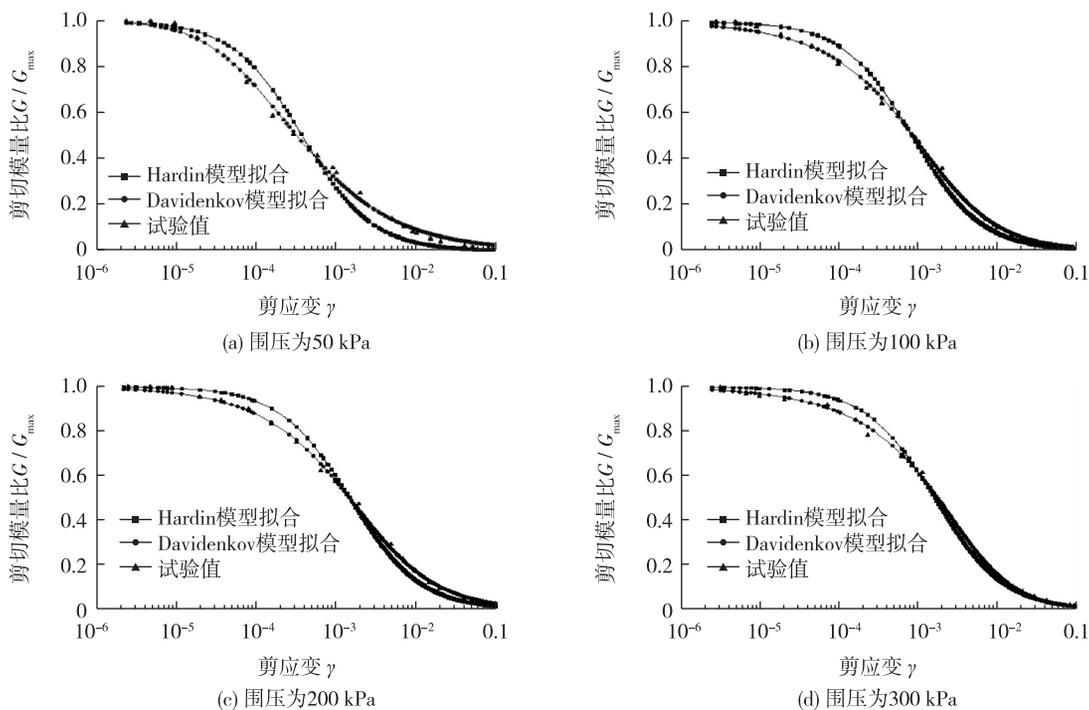


图 6 曲线拟合

Fig. 6 Fitting curves

本文对剪切模量比与剪应变的关系进行模型拟合,不同模型拟合参数值见表 1。表 1 中 R_{cs} 为加权检验系数,值越小表示拟合效果越好,本次拟合值最大值为 2.89×10^{-3} ,表示拟合效果较好; R_{ss} 为残差平方和,表示数据点与它在回归线上相应位置的差异,值越小表示拟合效果越好,本次拟合最大值为 0.060 7,说明拟合效果较好; R_{Adj}^2 为校正决定系数,越接近 1 表示拟合效果越好,本次拟合值介于 0.979 4~0.999 6,表示拟合效果较好。

表1 拟合参数值

Tab.1 Fitting parameter values

围压/kPa	拟合方法	R_{cs}	R_{ss}	R_{Adj}^2	拟合评价
50	Hardin-Drnevich 模型	2.89E-03	0.060 7	0.979 4	较差
	Davidenkov 模型	5.34E-04	0.010 2	0.996 2	较好
100	Hardin-Drnevich 模型	1.58E-03	0.033 2	0.989 4	较差
	Davidenkov 模型	2.42E-04	0.004 6	0.998 3	较好
200	Hardin-Drnevich 模型	1.53E-03	0.032 2	0.989 7	较差
	Davidenkov 模型	2.13E-04	0.004 0	0.998 6	较好
300	Hardin-Drnevich 模型	8.56E-04	0.018 0	0.994 2	较差
	Davidenkov 模型	5.76E-05	0.001 1	0.999 6	较好

从表1还可看出,同一围压下,用 Davidenkov 模型拟合得到的 R_{cs} , R_{ss} 及 R_{Adj}^2 均优于用 Hardin-Drnevich 模型得到的,由此表明:Davidenkov 模型对于拟合动剪切模量的效果要优于 Hardin-Drnevich 双曲线模型。

4 结 语

(1)本次试验得到的抗液化剪应力与振次之间有较好的乘幂关系,可用幂函数进行拟合。分析了不同固结应力比下粉砂动孔隙水压力与振次的关系,得出孔隙水压力与振次曲线可用指数函数拟合。

(2)通过对动剪切模量和阻尼比进行归一化处理,呈现出较好的规律性,并采用 Hardin-Drnevich 双曲线模型与 Davidenkov 模型对剪切模量比与剪应变的关系进行拟合,均具有较好的效果,且拟合效果随围压增加而变得更优。Davidenkov 模型更适合本次试验粉砂剪切模量比与剪应变的拟合。

参 考 文 献:

- [1] 刘家驹. 粉沙淤泥质海岸的航道淤积[J]. 水利水运工程学报, 2004(1): 6-11. (LIU Jia-ju. Silt siltation in approach channel of the coast with silty mud sediment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(1): 6-11. (in Chinese))
- [2] 周恩全, 王志华, 陈国兴, 等. 饱和砂土液化后流体本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 112-118. (ZHOU En-quan, WANG Zhi-hua, CHEN Guo-xing, et al. Constitutive model for fluid of post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 112-118. (in Chinese))
- [3] 周健, 杨永香, 刘洋, 等. 循环荷载下砂土液化特性颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1083-1088. (ZHOU Jian, YANG Yong-xiang, LIU Yang, et al. Numerical modeling of sand liquefaction behavior under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1083-1088. (in Chinese))
- [4] 颜可珍, 刘能源, 夏唐代. 基于判别分析法的地震砂土液化预测研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2049-2052. (YAN Ke-zhen, LIU Neng-yuan, XIA Tang-dai. Discriminant analysis model for prediction of sand soil liquefaction during earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2049-2052. (in Chinese))
- [5] 王刚, 张建民. 砂土液化大变形的弹塑性循环本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 51-59. (WANG Gang, ZHANG Jian-min. A cyclic elasto-plastic constitutive model for evaluating large liquefaction-induced deformation of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 51-59. (in Chinese))
- [6] 刘年平, 王宏图, 袁志刚, 等. 砂土液化预测的 Fisher 判别模型及应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 554-557, 622. (LIU Nian-ping, WANG Hong-tu, YUAN Zhi-gang, et al. Fisher discriminant analysis model of sand liquefaction and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 554-557, 622. (in Chinese))
- [7] 李男, 黄博, 凌道盛, 等. 斜椭圆应力路径下饱和松砂动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 156-162, 170. (LI Nan, HUANG Bo, LING Dao-sheng, et al. Experimental research on behaviors of saturated loose sand subjected to oblique ellipse stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 156-162, 170. (in Chinese))
- [8] 傅华, 陈生水, 韩华强, 等. 胶凝砂砾石料静、动力三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 357-362. (FU Hua, CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, et al. Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and

- gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 357-362. (in Chinese))
- [9] 周金领, 赵杰, 王桂莹, 等. 地基土粉砂层动力特性分析试验研究[J]. 防灾减灾学报, 2011, 27(2): 1-4. (ZHOU Jinling, ZHAO Jie, WANG Gui-xuan, et al. Laboratory study on dynamic properties of silty sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2011, 27(2): 1-4. (in Chinese))
- [10] 李永强, 景立平, 梁海安, 等. 土体动剪切模量测定及非线性拟合方法研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增1): 247-252. (LI Yong-qiang, JING Li-ping, LIANG Hai-an, et al. Testing and nonlinear fitting of dynamic shear modulus of soil[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Suppl1): 247-252. (in Chinese))
- [11] 张明, 廖蔚茗, 王志佳, 等. 黏性土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变关系的统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 256-262. (ZHANG Ming, LIAO Wei-ming, WANG Zhi-jia, et al. Statistical analysis of the relationship of shear modulus ratio and damping ratio to shear strain for cohesive soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 256-262. (in Chinese))
- [12] 彭盛恩, 王志佳, 廖蔚茗, 等. 土的动剪切模量比和阻尼比的经验模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 566-572. (PENG Sheng-en, WANG Zhi-jia, LIAO Wei-ming, et al. A Study on empirical models of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 566-572. (in Chinese))
- [13] 庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 436-442. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, LIANG Yan-xian, et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 436-442. (in Chinese))

Experimental studies on dynamic characteristics of silty sand for tailing dam foundation

YU Xiang-juan^{1,2}, WU Ke-xiong^{1,2}, GAO Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the dynamic properties of silty sand in a tailing pond and get the relative dynamic parameters, a series of laboratory tests about dynamic strength of silty sand were performed, and the normalized curve of the dynamic parameters with a very good regularity was obtained from resonant column tests and dynamic triaxial tests. Some important conclusions were obtained from the analysis of the deformation properties and strength properties. The influences of different consolidation ratios and consolidation pressures on the relationships between dynamic strength, pore water pressure and vibration times were analysed according to dynamic triaxial tests. It is found that the dynamic strength of the silty sand has a good exponential relationship with vibration times, which can be fitted by a power function. And the relationships between the dynamic pore water pressure ratio and vibration times can be fitted by an exponential function. The dynamic parameters of the silty sand was obtained to offer necessary parameters for the seismic design of engineering and relevant dynamic calculation. Meanwhile, the Hardin-Drnevich hyperbolic model and Davidenkov model were used to fit the dynamic shear modulus. The testing analysis results show that the fitting effects of two kinds of models are improved with the increase of the confining pressure, and the fitting effect of Davidenkov model is superior to Hardin Drnevich hyperbolic model under the same confining pressure. The research results can provide a reference value for the studies of dynamic characteristics of the silty sand.

Key words: silty sand; dynamic shear modulus; resonant column test; dynamic triaxial test; dynamic strength; Davidenkov model; Hardin Drnevich model