

超深厚覆盖层中深埋细粒土地震 残余变形特性振动三轴试验研究^①

刘启旺^{1,2}, 杨正权^{1,2}, 刘小生^{1,2}, 杨玉生^{1,2}, 陈 宁^{1,2}

(1.流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 2.中国水利水电科学研究院,北京 10004)

摘要:土石坝(超)深厚覆盖层地基中的深埋细粒土抗地震残余变形能力较差,尤其是在土层厚度较大时,覆盖层地基连同坝体在强震作用下可能会产生较大的地震沉陷。针对我国西部某大型土石坝工程,对超深厚覆盖层地基中深埋粉砂层土的地震残余变形特性进行三轴试验研究。研究表明:试验土料级配曲线与相应土层各钻孔平均级配曲线很接近,试验土料的颗粒级配对实际土层的颗粒组成特性具有代表性;试验土料的地震残余变形特性主要受土体密度、固结条件和围压力条件等控制,尤其是固结比对土体地震残余变形特性影响较大;各因素对土体残余体积变形特性和轴向变形特性的影响规律有所差异。

关键词:超深厚覆盖层; 振动三轴试验; 颗粒组成特性; 地震残余变形特性; 固结

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0021-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0021

Dynamic Triaxial Tests on Seismic Residual Deformation Characteristics of the Fine-Grained Soil in Super-deep Overburden Layer

LIU Qi-wang^{1,2}, YANG Zheng-quan^{1,2}, LIU Xiao-sheng^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2}, CHEN Ning^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038;

2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048)

Abstract: The seismic capacity of residual deformation of the fine-grained soils which are buried deeply in super-deep overburden layer is poor, and a great seismic settlement of dam-foundation system may be produced by the earthquake when the thickness of soil layer is large. So it is significant for the anti-seismic design of dam to study the seismic residual deformation characteristics of soil and determine the corresponding characteristic parameters. In the paper, a series of dynamic triaxial tests on silty sands buried deeply in the super-deep overburden layer foundation of an earth-rock fill dam in China are carried out, and the seismic residual deformation characteristics of soils in earthquake are analyzed. The results show that: (1) the grading curve of testing soil is consistent with the mean grading curve of corresponding drill on field soils, and the grain composition properties of field soils can be represented by the testing soil; (2) the seismic residual deformation characteristics of testing soil is influenced by the density of soil and the stress condition, and the consolidation ratio is a significant influencing factor; (3) the influencing laws of factors on axial deformation characteristics and those on residual volumetric deformation of soils are different.

Key words: super-deep overburden layer; dynamic triaxial test; grain composition properties; seismic residual deformation characteristics; consolidation ratio

① 收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划, No.2013CB036404); 中国水利水电科学研究院科研专项(岩集 1467)

作者简介: (1962-), 男, 北京市人, 高级工程师, 主要从事土动力学及土工结构抗震研究. E-mail: liuqw@iwahr.com

0 引言

随着我国水利水电事业深入开展,强震和深厚覆盖层问题成为了我国水电工程建设面临的双重挑战,且难以规避。深厚覆盖层地基在土石坝建设中已经相当普遍^[1]。土石坝超深厚覆盖层地基中深埋细粒土的动力特性,对覆盖层自身地震动力反应特性和其上土石坝动力反应特性及抗震性能具有较大影响^[2-3]。尤其是在其厚度较大时,由于其抗地震残余变形能力相对较差,在强震的作用下覆盖层地基连同坝体可能会产生较大的地震沉陷,危及大坝安全,影响枢纽的正常使用。

我国西部某大型水电工程的拦河大坝为心墙堆石坝,大坝地基主体为河谷超深厚覆盖层,钻孔揭露覆盖层最大深度超过 500 m,且区域地震危险性很高,坝址区 100 年超越概率 2% 基岩水平向加速度峰值超过 0.5 g。坝址区整个河谷超深厚覆盖层地基主要由 6 个地层构成,从自由地表到基岩表面分别为:④层,现代河床冲积砂卵砾石层;③-3 层,河湖相沉积含砾砂层(夹粉质砂);③-2 层,河湖相沉积粉质黏土层;③-1 层,河湖相沉积含砾砂层(夹粉质砂);②层,冲洪积、堆积含碎(卵)砂层;①层,冰碛及冰水堆积块碎石土层。其中,③-1 层不仅埋深大(80 m 左右),而且土层很厚(150~170 m),土层中粉质细砂土的基本物理性质指标较差,具有天然密度小、承载力低和抗变形能力差等特点。因此,研究该类土的地震残余变形特性,确定相应特征参数,对合理预测大坝连同地基在强震作用下的地震沉陷具有重要意义。

本文针对超深厚覆盖层地基中的深埋细粒土(③-1 层粉质砂土)进行振动三轴试验,研究土的地震残余变形特性,并为大坝-地基系统动力分析和抗震设计提供基础资料。主要包括:进行土的基本物理特性试验,验证试验土料对现场土层特性的代表性,并结合现场试验资料和静力计算成果,综合确定本次试验的控制条件,包括试验控制密度和应力条件等;进行土的固结、排水振动三轴试验,研究试验土料的地震残余变形特性,分析相关因素对土的地震残余变形特性影响规律;确定试验土料的地震残余变形特性参数,为大坝动力分析和抗震设计提供基本资料。

1 试验设备与试验控制条件

1.1 试验设备

由于试验土料属细粒土,三轴试样尺寸统一为

$\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。试验在日本产 S-3-D 电液伺服中型振动三轴仪上进行,整个试验设备由试验主机、轴向和侧向加载系统、水气控制面板和测试与采集系统等组成(图 1)。该设备可提供的最大周围压力为 2.5 MPa,最大轴向荷载为 20 kN,可进行轴向上多种波形的周期性加载。



图 1 S-3-D 电液伺服中型振动三轴仪

Fig.1 S-3-D electro-hydraulic servo medium-sized dynamic apparatus

1.2 试验条件的确定

由于实际覆盖层中,研究对象土料的分布较广,不同位置土料的基本物理性质指标有一定差异。因此,现场取回试验土料的颗粒级配特性以及试验控制土料密度是否对整个土层具有代表性,是试验成果是否可靠、能否代表实际土层相应特性的重要影响因素。

为了验证试验土料对整个土层颗粒组成特性具有代表性,对现场来料进行了颗粒分析试验,并与现场钻孔取料的级配曲线进行对比。现场各钻孔取土级配曲线及其平均级配曲线和试验土料级配曲线的对比,如图 2 所示。从图 2 可以看出,各钻孔取得土料的级配曲线在一定范围内变动,试验土料级配曲线与各孔平均级配曲线很接近,试验土料级配特性对实际土层的总体颗粒组成特性具有代表性。

试验控制干密度根据来料的室内相对密度试验成果,并结合现场各钻孔相对密度测试成果联合确定。室内试验表明,试验土料的最大干密度和最小干密度分别为 1.92 g/cm^3 和 1.35 g/cm^3 ,而现场各钻孔取土的平均相对密度为 78%,因此根据公式(1)^[4],综合确定试验装料控制干密度为 1.78 g/cm^3 。

$$\rho_d = \frac{\rho_{d\max} \cdot \rho_{d\min}}{\rho_{d\max} - D_r(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})} \quad (1)$$

式中, ρ_d 为试验控制干密度; $\rho_{d\max}$ 和 $\rho_{d\min}$ 分别代表土的最大干密度和最小干密度; D_r 为一定状态土的相对密度。

根据大坝-地基系统静力分析得到土层中土体

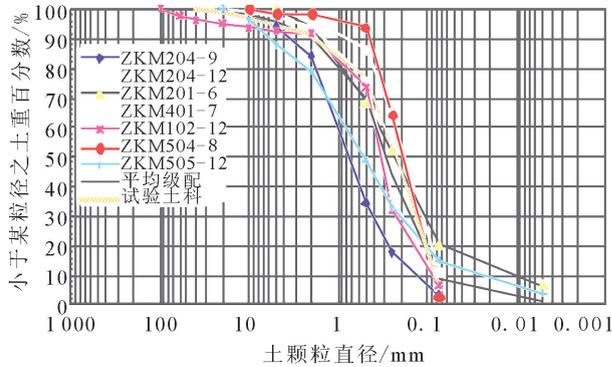


图 2 试验土料级配曲线及其和现场典型钻孔取料级配曲线的对比

Fig.2 Contrast of the grading curves of testing soil and field soil

的受力状态,并结合试验设备的具体性能,确定试验的应力控制条件:有效围压力范围为 800 ~ 2 500 kPa,固结比为 1.5 和 2.0。试验在固结排水条件下进行,激振波形为规范正弦波,激振频率 1 Hz。

2 土料的地震残余变形特性

2.1 试验数据处理方法

土体的地震残余变形特性包括土体在地震荷载作用下的残余体积变形特性和残余轴向变形特性。

已有研究表明,在一定固结应力条件和一定动应力水平作用下,土体单元残余变形的大小与规则振动的振动周次有关。因此,分析土体在不规则地震动荷载作用下的动力残余变形特性时,需将随机变化的地震荷载转化为与之等价的等效振次规则周期荷载,而规则周期荷载的等效振次则取决于地震震级的大小。通过考察一定振次规则周期荷载作用下土体的地震残余变形特性,来研究相应随机地震荷载作用下土体的地震残余变形特性^[5]。本次试验采用规范正弦波激振,分别按 12、20 和 30 次对试验结果进行整理,相应的地震震级分别为 7、7.5 和 8 级。

首先,整理出一定固结应力条件时,土体在不同水平动剪应力作用下的残余变形同振动周次 N 间的关系曲线;其次,根据残余变形-振次关系曲线,整理得到土体在特定振动周次 N_0 作用下的残余变形与动剪应力比间的关系曲线;最后,将残余变形和动剪应力比间的关系用某种数学关系式表达,并用数据拟合的方法确定相应特征参数。动剪应力比定义为: $\Delta\tau/\sigma'_0$; $\Delta\tau$ 为试样 45° 面上的动剪应力, $\Delta\tau = \sigma_d/2$ (σ_d 为单幅轴向动应力); σ'_0 为试样 45° 面上初

始有效法向应力, $\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, σ'_1 和 σ'_3 分别为试样固结时的有效大、小主应力。

本次试验中土体残余变形与动剪应力比间的关系用中国水科院提出的幂函数形式表达^[6],认为土在一定固结应力条件下,其地震残余变形(包括残余体变和残余轴变)和动剪应力比之间满足幂函数关系,即:

$$\epsilon_v = K_v (\Delta\tau/\sigma'_0)^{n_v} \quad (2)$$

$$\epsilon_p = K_p (\Delta\tau/\sigma'_0)^{n_p} \quad (3)$$

式中,残余体应变 ϵ_v 和残余轴向应变 ϵ_p 用百分数表示; K_v 、 n_v 、 K_p 、 n_p 分别为与土料类别、应力状态和振动周次等相关的参数,表征土体的抗地震残余变形能力, K_v 、 n_v 为残余体变系数和指数, K_p 、 n_p 为残余轴向应变系数和指数。

2.2 基本试验结果及影响因素分析

2.2.1 残余体积变形

图 3 给出了不同固结应力条件时,试验土料在不同动剪应力比地震动作用下的残余体应变 ϵ_v 随振动次数 N 增长的变化关系曲线;图 4 给出了整理得到的特定振次 N_0 对应的残余体应变 ϵ_v 与动剪应力比 $\Delta\tau/\sigma'_0$ 间的关系曲线和拟合幂函数表达式;表 1 给出了表征土体地震残余体变特性参数的汇总。

从图 3 可以看出:随着振次的增加,土体残余体应变逐渐增加,在线性-对数坐标系中,两者近似为直线关系;对同样固结应力条件的试样,随着激振动剪应力比的增加相同振次下对应的残余体变值也较大;水平相当的动剪应力作用下,随着试样周围压力的提高振动产生的土体残余体变也逐步提高;水平相当的动剪应力作用下,随着固结比的提升土体残余体应变变小,这一点在高围压时体现的更加明显。

从图 4 并结合表 1 可知:幂函数拟合曲线和原始试验点的对比表明,土体残余体变和动剪应力比间体现出较好的幂函数关系;固结比为 1.5 时,随着围压力的增加,残余体变系数变化不大且数值变化无规律,而体变指数小幅降低;固结比为 2.0 时,随着围压力的增加,残余体变系数大幅提升,体变指数也小幅增加。同等围压力条件下,固结比较大时,土体的地震残余体变系数较固结比小时大得多。不同振次(地震震级)对应的土体地震残余体变特征参数基本相当。

2.2.2 地震残余轴向变形

图 5 给出了不同固结应力条件时,试验土料在不同动剪应力比地震动作用下残余轴向应变 ϵ_p 随

振动次数 N 增长的变化关系曲线;图 6 给出了整理得到的特定振次 N_0 对应的残余轴向应变 ϵ_v 与动剪应力比 $\Delta\tau/\sigma'_0$ 间的关系曲线和拟合幂函数表达

式;表 2 给出了表征土体地震残余轴向变形特性参数的汇总。

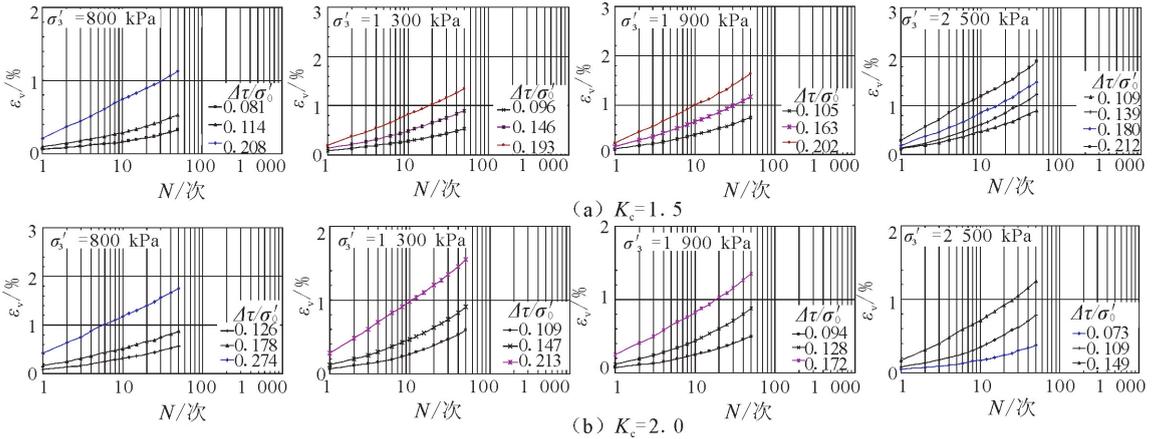


图 3 试验土料残余体变随等效振次发展的增长关系

Fig.3 Growth curves of the residual volumetric changes of testing soil with equivalent vibration cycles

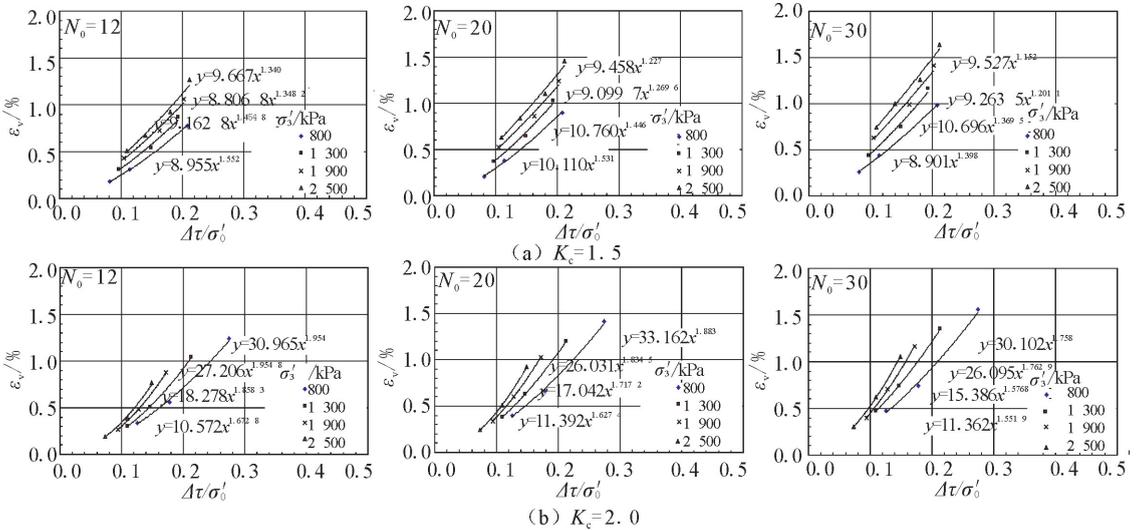


图 4 特定振次(震级)对应的土体残余体应变与动剪应力比关系曲线及模型参数拟合

Fig.4 Relationship curves of soil residual volumetric strain corresponding to specific vibration cycles (magnitude) and dynamic shear stress ratio and model parameters fitting

表 1 地震残余体变特性参数汇总

Table 1 Characteristic parameters of soil residual volumetric change under earthquakes

平均有效应力/kPa	固结比	$N_0=12$ 次		$N_0=20$ 次		$N_0=30$ 次	
		K_v	n_v	K_v	n_v	K_v	n_v
800	1.5	8.955	1.552	10.110	1.531	8.901	1.398
1300	1.5	9.163	1.455	10.760	1.446	10.696	1.370
1900	1.5	8.807	1.348	9.100	1.270	9.264	1.201
2500	1.5	9.667	1.340	9.458	1.227	9.527	1.152
800	2.0	10.572	1.673	11.392	1.627	11.362	1.552
1300	2.0	18.278	1.858	17.042	1.717	15.396	1.577
1900	2.0	27.206	1.955	26.031	1.835	26.095	1.763

2 500

2.0

30.965

1.954

33.162

1.883

30.102

1.758

从图 5 可以看出:和残余体变与振次间关系基本一致,随着振次增加,土体残余轴向应变也在增加,在线性-对数坐标系中,两者基本呈直线关系;振动剪应力比越高,相同振次所产生的残余轴向应变也越大;水平相当的动剪应力作用下,随着试样周围压力的提高,振动产生的土体残余轴向应变也在提高;相当水平动剪应力的作用下,随着固结比的提升,土体残余轴向应变变小,低围压时这一关系体现的更明显。

从图 6 并结合表 2 可知:拟合曲线和原始试验点的对比表明,土体残余轴向应变和动剪应力比间

呈较好的幂函数关系;随着围压力的增加,残余轴向应变系数逐渐增加,固结比较大时,这一增加的幅度也较大,随着围压力的增加,残余轴向应变指数在固结比为 1.5 时基本不变,而在固结比为 2 时小幅提升;同等围压力条件下,固结比较大时,土体的地震残余轴向应变系数较固结比小时大得多,残余轴向应变指数也较高;不同振次(地震震级)对应的土体地震残余轴向应变特征参数,在固结比为 1.5 时基本相当,在固结比为 2.0 时则有一定差异,随着地震震级的提升,两个残余轴变特征参数均小幅降低。

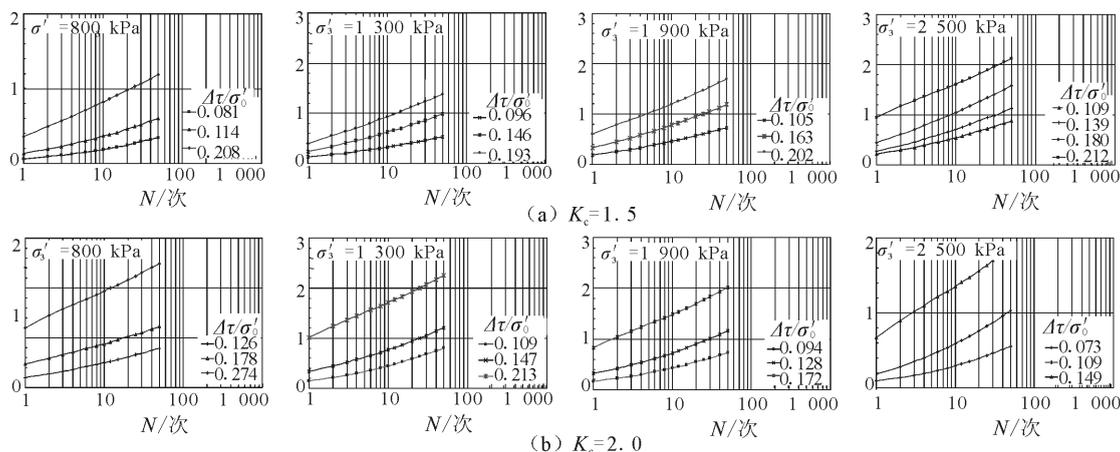


图 5 试验土料残余轴向应变随等效振次发展的增长关系

Fig.5 Growth curves of the residual axial strains of testing soil with equivalent vibration cycles

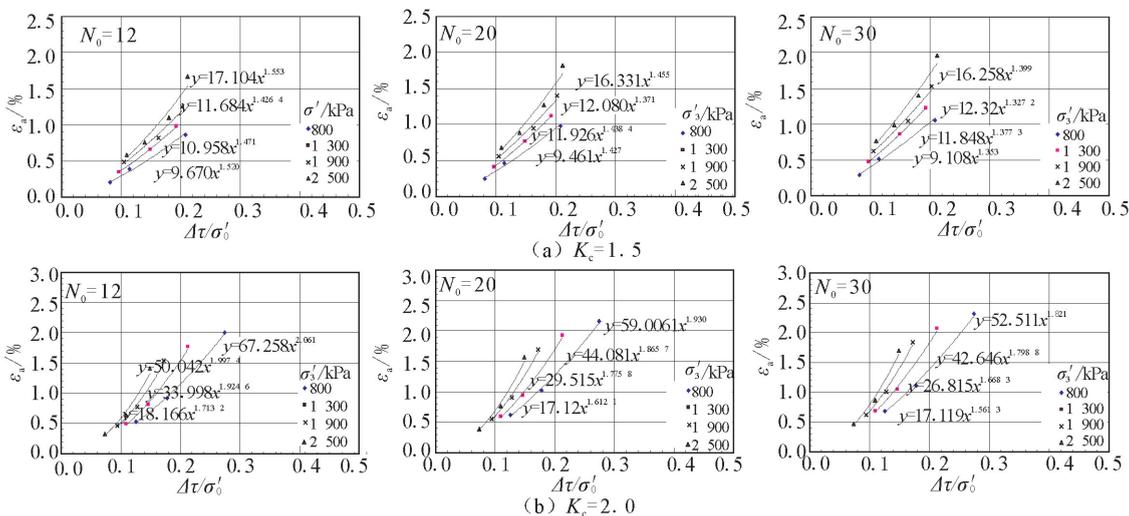


图 6 特定振次(震级)对应的土体残余轴向应变与动剪应力比关系曲线及模型参数拟合

Fig.6 Relationship curves of soil residual axial strain corresponding to specific vibration cycles (magnitude) with dynamic shear stress ratio and model parameters fitting

表2 地震残余轴向变形特性参数汇总

Table 2 Characteristic parameters of soil residual axial deformation under earthquakes

平均有效应力/kPa	固结比	$N_0=12$ 次		$N_0=20$ 次		$N_0=30$ 次	
		K_p	n_p	K_p	n_p	K_p	n_p
800	1.5	9.670	1.520	9.461	1.427	9.108	1.353
1 300	1.5	10.958	1.471	11.926	1.438	11.848	1.377
1 900	1.5	11.684	1.426	12.080	1.371	12.320	1.327
2 500	1.5	17.104	1.553	16.331	1.455	16.258	1.399
800	2.0	18.166	1.713	17.120	1.612	17.119	1.561
1 300	2.0	33.998	1.925	29.515	1.776	26.815	1.668
1 900	2.0	50.042	1.997	44.081	1.866	42.646	1.799
2 500	2.0	67.258	2.061	59.006	1.930	52.511	1.821

4 结论

针对某土石坝工程超深厚覆盖层地基中的深埋细粒土进行土的地震残余变形特性振动三轴试验,研究土的地震残余变形特性,并为大坝-地基系统动力分析和抗震设计提供基础资料。主要的研究结论为:

(1) 各钻孔取得土料的级配曲线在一定范围内变动,试验土料级配曲线与各孔平均级配曲线很接近,试验土料级配特性对实际土层的总体颗粒组成特性具有代表性;

(2) 采用试验土料室内相对密度试验成果和现场各钻孔相对密度测试成果相结合的方法确定试验控制干密度,可以相对合理地反映现场土的天然密度状态;

(3) 土的地震残余体积应变和轴向应变同地震作用动剪应力比间呈良好的幂函数关系,用幂函数的模式表征土体的地震残余变形同地震作用动剪应力间的关系具有良好的适用性;

(4) 土的地震残余变形特性主要受围压力条件、固结条件和密度的控制,尤其是固结比对土体地震残余变形特性影响较大,各因素对土体残余体积变形特性和轴向变形特性特征参数的影响规律有所差异。

参考文献 (References)

- [1] 罗守成.对深厚覆盖层地质问题的认识[J].水力发电,1995,21(4):21-24.
LUO Shou-cheng. Cognition of Geological Problems of Thick

Overburden Layer[J]. Water Power, 1995, 21(4): 21-24. (in Chinese)

- [2] 杨正权.土石坝动力分析方法振动台模型试验验证及地震动输入研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2011.
YANG Zheng-quan. Study on Dynamic Analysis Methods Verification Using Shaking Table Model Test and Seismic Motion Input of Earth-rock Fill Dam [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), 2011. (in Chinese)
- [3] 杨正权,刘小生,周祥鹏,等.深厚覆盖层场地地动特性研究[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集.乌鲁木齐:[s.n.],2013:11487-11492.
YANG Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, ZHOU Xiang-peng, et al. Study on Seismic Motion Characteristics of Deep Overburden Layer[C]//Symposium of the 22nd China academic Conference on Structure Engineering. Urumchi China: [s.n.], 2013: 11487-11492. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国水利部,SL237-1999 土工试验规程[S].1999. Ministry of Water Resources of PRC. Code of Soil Test (SL237-1999)[S]. Beijing: China Water Resource and Hydropowder Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [5] Seed H B, Idriss I M, Makdisi F I, et al. Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses[R]. Berkeley: EERC University of California, 1975.
- [6] 王昆耀,常亚屏,陈宁,等.“八五”国家科技攻关项目研究报告——砂砾料动力工程性质研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,1994.
WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, Chen Ning, et al. Study on Dynamic Engineering Characteristics of Sandy Gravel[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1994. (in Chinese)