DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.05.002

何亮,李国英,杨杰. 土石坝坝基覆盖层动力特性参数试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 15-20. (HE Liang, LI Guo-ying, YANG Jie. Experimental studies on dynamic characteristic parameters of covering layer of earth rockfill dam foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 15-20.)

土石坝坝基覆盖层动力特性参数试验研究

何亮^{1,2},李国英¹,杨杰¹

(1. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 核工业南京 工程勘察院, 江苏 南京 211102)

摘要:采用室内动力特性试验和现场剪切波速测试,对某水电站土石坝坝基各土层最大剪切模量进行了分析。 其中现场剪切波速测试分别采用了单孔法和跨孔法,共获得4组剪切模量随深度变化的曲线,分析表明,4组曲线 的变化规律一致,即随深度的增加,土体越密实,剪切模量总体趋势变大;数据的波动性也反应了土性差异对剪切 模量的影响。文中还分土层分析了室内试验中的固结比取值、密度取值以及波速测试中土的不均匀性对波速测 试和室内试验结果的影响,认为密度取值、土的不均匀性为主要影响因素,固结比为次要因素,试样制备中的密度 取值越接近实际土层,所得到的室内试验值与现场测试值就越接近。

关 键 词: 土石坝; 坝基; 动力特性试验; 剪切波速测试; 剪切模量

中图分类号: TU411.8 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2015)05-0015-06

最大动剪切模量是分析土动力特性所需的关键性参数^[1-3],常由室内动力特性试验或现场剪切波速法 测试获得。室内试验能控制各种应力条件对土体进行不同级配、不同密度、不同饱和度的试验,但试验所用 试样与土体实际情况相差较大,且试验费时费力。波速测试忠实于现场土体的原状结构性,能反映出现场的 多变性和复杂性,但只能测得天然应力下天然土体的动剪模量。

波速测试法被认为是获取最大剪切模量可靠的方法之一,但国内外大量研究和试验结果表明室内试验 测得的最大动剪切模量,与波速测试结果相比明显偏低,表明室内试验精度不高。K. D. Pitilakis 等^[4]对希 腊的天然沉积土进行了现场和室内试验,室内测定的剪切波速值总是比现场要低很多。俞培基等^[5]对比波 速测试法与原状土室内共振柱试验结果,发现室内试验测定的剪切波速值明显偏低,分析认为主要原因是两 种试验的固结时间不同。蒋寿田等^[6]对比波速测试和室内共振柱仪测试的结果,认为波速测试的最大动剪 切模量比室内试验结果要高 80%~170%。

影响室内试验结果精度的因素有很多,目前研究的热点主要有原状土取样的扰动、室内人工制备土样与 原状结构的差异、原状土的不均匀性和各向异性、固结应力比和固结时间效应等因素。王建华等^[7]研究了 取样扰动对砂性土和黏性土剪切波速的影响。孙静等^[8]认为固结比是造成实验室和现场测试土最大动剪 切模量之间明显差异的重要原因之一。俞培基等^[5]采用跨孔法和共振柱试验测定填土的最大动剪切模量, 两种试验测试结果相差较大,认为固结时间效应是一个重要影响原因;高志兵等^[9-13]也从不同角度对此进行 了研究。此外室内试验采用的仪器(主要为共振柱、动三轴和扭剪仪)和试验方法不同,测定土的动剪切模 量也有差别。徐存森等^[14-15]对此进行了研究。

以往的研究中室内试验多采用共振柱,试样也多采用原状土样。本文以某水电站工程为研究对象,分别

作者简介:何 亮(1983—),男,江西九江人,工程师,博士研究生,主要从事土石坝工程抗震研究。

E-mail:springday_2007@163.com

收稿日期: 2015-01-05

基金项目:水文水资源与水利工程科学国家重点实验室资助项目

进行了人工制备试样的室内动三轴试验和现场剪切波速测试。获得了坝基覆盖层中各土层的最大动剪切模 量,并分析了两者之间存在差异的原因,研究了室内试验精度的影响因素,对无法进行现场原位测试的大坝 改建扩建工程具有十分重要的意义。

工程概况 1

某水电站坝址区河床覆盖层一般厚度为60~80 m,最厚可达91.2 m。土层从上至下依次为:①砂卵砾 石;②低液限黏土;③卵石混合土;④(含)细粒土质砂(砾);⑤混合土卵石(碎石);⑥冰积块碎石。各土层 深度(以ZKS232-1 孔为例):0~7.0 m 为砂卵砾石,7.0~17.7 m 为低液限黏土,17.7~36.0 m 为卵石混合 土,36.0~40.5 m 为细粒土质砂,40.5~63.0 m 为卵石混合土,63.0~80.0 m 为块碎石。筑坝过程中会将① 和②层挖除或作地基处理,本文不做研究。

现场剪切波速测试 2

在水电站坝址区进行了4个单孔波速测试,分别为ZKS207,ZKS232-1,ZKS233和ZKS234,以及两组跨 孔波速测试,分别为 ZKS232~ZKS232-1 和 ZKS234~ZKS234-1。

单孔波速法是在同一孔中,在孔口设置振源,孔内不同深度处固定检波器,测出孔口振源所产生的波传 到孔内不同深度处所需的时间,计算传播速度;跨孔法以一孔为激振孔,另布置2孔或3孔作检波孔,测定剪 切波自激发至接收的时间间隔,计算传播速度。单孔法可用于获得同一钻孔中测点间土层的剪切模量。跨 孔法可用于获得地面下不同深度两个钻孔间土体的剪切模量。

由剪切波的波速 v。可确定动剪切模量 G':

$$G' = \rho v_s^2 \tag{1}$$

式中: ρ 为土层密度。

室内动力特性试验 3

3.1 试样制备

室内动三轴试验所用试样为现场钻孔取样,所用级配根据现场筛分级配曲线挑选有代表性的级配,先采 用相似级配法(n=2),再采用等量替代法进行缩制而成,试样分5层制备。

(4)

3.2 试验结果

动剪切模量 E'_{max} 与平均有效主应力 σ_m 之间可用下式表示:

$$E_{\max} = k'_{2} p \left(\frac{\sigma_{\mathrm{m}}}{p}\right)^{n}$$
(2)

动力分析中一般用剪切模量,动剪切模量和动弹性模量之间有如下关系:

$$G'_{\max} = \frac{E'_{\max}}{2(1 + v_{d})}$$
(3)
$$k_{2} = \frac{k'_{2}}{2(1 + v_{d})}$$
(4)

Tab. 1 Calculation parameters of Shen Zhujiang model

式中: k'2, k2 和 n 为动力弹性模量计算参数; p 为标准大气 压力,各土层泊松比 v_d 取经验数值 0.5。

根据试验得出的南京水利科学研究院沈珠江模型计算 参数如表1所示。

试样名称 ρ/	(g • cm ⁻³	³) K	k'_2	n	k_2
第③层	2 25	1.5	4 475	0.426	1 682
卵石混合土	2.23	2.0	4 782	0.413	1 798
第④层	1 92	1.5	908	0.682	341
细粒土质砂	1. 82	2.0	1 012	0.668	380
第⑤层	2 27	1.5	4 828	0.415	1 815
混合土卵石	2.21	2.0	5 044	0.407	1 896

4 现场波速测试和室内试验结果对比

波速测试和室内试验获得的不同土层和深度的最大剪切模量数据见表 2。

表 2 室内试验和波速测试获得的最大剪切模量 Tab. 2 Maximum shear modulus data obtained from indoor tests and wave velocity tests

土层	深度/ Z	单孔法	跨孔法 室内试验			单孔法	跨孔法	室内试验		
		ZKS232-1	ZKS232~ZKS232-1	K = 1.5	K = 2.0	土层	ZKS232-4	ZKS234~ZKS234-1	K = 1.5	K = 2.0
	ш	<i>G</i> ′/GPa	G'/GPa	<i>G'/</i> GPa	G'∕GPa		G'∕GPa	G'/GPa	<i>G'/</i> GPa	G'/GPa
3	18						0. 249	0. 230	0. 247	0.260
	20	0.249	0. 329	0.259	0. 273	3	0.351	0. 288	0.259	0.274
	22	0.311	0.409	0.271	0. 285		0.352	0.312	0.271	0.286
	24	0.352	0. 298	0. 282	0. 297		0.401	0.405	0.282	0. 297
	26	0.352	0. 489	0. 293	0.308		0.401	0.277	0. 293	0.308
	28	0.401	0.366	0.303	0.318		0.534	0. 299	0.303	0.319
	30	0.401	0.386	0.313	0.328		0.534	0.468	0.313	0.328
	32	0.461	0.329	0.322	0.340		0.627	0.405	0.323	0.338
4	34	0.310	0.310	0. 101	0.110	4	0.398	0. 264	0.101	0.110
	36	0.310	0.383	0.105	0.114		0.310	0. 296	0.105	0.114
	38	0.350	0.455	0.109	0.118	3	0.354	0. 492	0.348	0.363
	40	0.398	0.405	0.113	0.122		0.462	0. 424	0.356	0.372
	42	0.457	0. 589	0.116	0.126		0.462	0. 547	0.364	0.380
	44	0.457	0. 484	0.120	0.131		0.313	0. 424	0.371	0.388
	46	0.530	0.369	0.124	0.134		0.354	0.468	0.379	0.395
	48	0.622	0.413	0.128	0. 138		0.403	0. 424	0.386	0.402
5	50	0.512	0. 542	0.413	0.424	5	0.536	0. 492	0. 393	0.410
	52	0.446	0.480	0.420	0.432		0.697	0.409	0.470	0.482
	54	0.446	0.542	0.427	0. 439		0.697	0.676	0.476	0.488
	56	0.446	0.428	0.434	0.446		0.829	0.717	0.482	0.494
	58	0.512	0. 413	0. 441	0. 453		1.003	0.862	0.488	0. 500
	60	0.512	0. 413	0.448	0.460		0.829	0.605	0. 494	0.506
	62	0.512	0. 499	0.455	0.467		0.697	0.809	0.500	0.512

注:土层③为卵石混合土;土层④为(含)细粒土质砂(砾);土层⑤为混合土卵石(碎石)。

4.1 波速试验测试结果对比

根据表 2 的数据分析结果如下:表中 4 组波速法测试的剪切模量随深度的变化规律是相同的,随深度的 增加,土体越密实,剪切模量总体趋势变大。此外,数据的波动性也反应了土性差异和土层不均匀性对剪切 模量的影响。进一步分析可知,相邻位置不同方法如 ZKS232-1 单孔法和 ZKS232~ZKS232-1 跨孔法,由于 两者测试土层差别小,所以测得的剪切模量之间差值较小(见图 1);不同位置相同方法如 ZKS232~ZKS232-1 跨孔法和 ZKS234~ZKS234-1 跨孔法,由于两者测试③和④层土差别小,而⑤层差别大,所以两者测得的 剪切模量之间③和④层土差值小,⑤层差值大(见图 2)。











4.2 波速测试与室内试验结果对比

图 3 和 4 为 ZKS232-1 和 ZKS234 的跨孔法和室内试验获得剪切模量随深度的变化,室内试验采用固结比 *k*=2 的数据,波速测试值采用跨孔法测试的数据(由于多层场地)。





图 4 ZKS234~ZKS234-1 孔波速测试与室内试验结果对比 Fig. 4 Comparison between measured wave velocities in ZKS 234~ZKS234-1 holes and laboratory test results

图 3 ZKS232~ZKS232-1 孔波速测试与室内试验结果对比 Fig. 3 Comparison between measured wave velocities in

ZKS 232~ZKS232-1 holes and laboratory test results

分土层进行数据分析可知:

(1)以往学者的研究成果表明,固结时间效应和土结构性对黏粒含量较大土体的试验结果影响较大。 本次试验涉及的③,④和⑤层土中,土体主要以粗颗粒为主,黏粒含量小,因此认为固结时间效应和土结构性 的影响可忽略不计。

(2)第③层为卵石混合土,卵砾石约占(30~50)%,松散~中密,干密度2.31 g/cm³。该层室内试验比现 场波速测试测得的最大动剪模量低,两者比值大部分在1.2 以内,最大为1.4,两者差别不大。由于室内试 验密度取值为2.25,与实际相差不大,因此可认为密度取值不是主要影响因素,推测主要影响因素应为波速 测试中土的不均匀性。

(3)第④层为含细粒土质砂,以砾砂为主,稍密~中密,干密度 2.04 g/cm³。该层现场波速测试得到的剪 切模量比试验得到的模量普遍偏大,两者比值大部分在 3 左右,最大为 4.7。分析认为导致差异较大的主要 原因是室内试验密度取值过小,仅为 1.82 g/cm³,而实际情况下天然密度为 2.04 g/cm³。

(4)第⑤层为混合土卵石。该层碎石约占(50~60)%,中密~密实,干密度 2.36 g/cm³。该层现场波速 测试得到的剪切模量较室内试验得到的相差不大,但数值的规律性不如第③层土,波动性较大,图 3 中两者 比值大部分在 1 左右,数值较为接近。图 4 中两者比值大部分在 1.5 左右,最大为 1.7。室内试验密度取值 为 2.27 与实际相差不大,同第③层土,可认为密度取值不是主要影响因素,波速测试中土的不均匀性是主要 影响因素。

本文还研究了固结比对室内试验的影响,将室内试验固结比从 1.5 提高到 2.0 时,最大剪切模量将会增加,但增加幅度较小,最大为 9%。因此可认为固结比不是主要影响因素。自由场地中固结比 *k* 一般为 1.4~2.7,因此本次试验采用 2.0 的固结比较为合理。

5 结 语

(1)两个不同钻孔中的两种波速测试结果对比,反应了试验场地土体不均匀性和土性差异,但最大剪切 模量随土层和深度的变化符合规律,随深度增加,土体越密实,剪切模量总体趋势变大,证明了本次现场波速 测试结果合理。

(2)本次试验涉及的③,④和⑤层土中,土体主要以粗颗粒为主,黏粒含量小,因此认为固结时间效应和 土结构性的影响可忽略不计。后续可开展黏性土的原状结构性和固结时间效应对试验结果的影响研究。

(3)分土层对波速测试和室内试验结果进行影响因素分析,认为密度取值、土不均匀性为两者差异的主要影响因素,固结比为次要因素。研究表明试样制备中的密度取值接近实际土层,所得室内试验值与现场测试值较为接近。

(4)由于经费有限,试验成本较高,在后续工作中,还可开展多组固结应力比、不同试验仪器和方法、不同级配和颗粒组成等情况下室内试验和波速测试的对比研究。

参考文献:

- [1] 李国英, 沈婷, 赵魁芝. 高心墙堆石坝地震动力特性及抗震极限分析[J]. 水利水运工程学报,2010(1): 1-8.(LI Guoying, SHEN Ting, ZHAO Kui-zhi. Seismic dynamic behavior and limit aseismic analysis on high earth core rockfill dams[J].
 Hydro-Science and Engineering, 2010(1): 1-8.(in Chinese))
- [2] 张世殊,张建海,余挺,等.双江口水电站坝体材料及覆盖层坝基动力变形特性研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9
 (4):13-17.(ZHANG Shi-shu, ZHANG Jian-hai, YU Ting, et al. Study on dynamic deformation characteristics of dam materials and overburden in Shuangjiangkou hydropower station[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9
 (4):13-17.(in Chinese))
- [3] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972,98(6): 603-624.
- [4] PITILAKIS K D, ANSTASSIADIS A, ROPTAKIS D. Field and laboratory determination of dynamic properties of nature soil deposits[C] // Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Balke ma Rotteram, 1992.
- [5] 俞培基,郭锡荣. 现场和室内测定粘性土的动剪模量[C]//全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编, 1986. (YU Pei-ji, GUO Xi-rong. Field and laboratory tests of dynamic shear modulus of soil[C]//The National Symposium on Earth Structures and Earthquake Resistance of Foundation, 1986. (in Chinese))
- [6] 蒋寿田,王幸辛.郑州地区地基原状土动模量和阻尼比[C]//第三届全国土动力学学术会议.上海:同济大学出版社, 1990:151-155.(JIANG Shou-tian, WANG Xing-xin. Dynamic modulus and damping ratio of undisturbed soil in Zhengzhou[C]
 //The 3rd China Conference of Soil Dynamics. Shanghai: Tongji University Press, 1990:151-155.(in Chinese))
- [7] 王建华,程国勇,张立.取样扰动引起土层剪切波速变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2604-2609.(WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong, ZHANG Li. Study on variation of shear wave velocity caused by sampling disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2604-2609.(in Chinese))
- [8] 孙静, 袁晓铭. 固结比对黏性土动剪切模量影响的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1457-1462. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming. The effect of consolidation ratios on dynamic shear modulus of undisturbed cohesive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1457-1462. (in Chinese))
- [9] 高志兵,高玉峰,谭慧明. 饱和黏性土最大动剪切模量的室内和原位试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 731-735. (GAO Zhi-bing, GAO Yu-feng, TAN Hui-ming. Lab and in-situ tests on maximum dynamic shear modulus of saturated

clay soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 731-735. (in Chinese))

- [10] 张立,王建华,程国勇.土样现场和室内剪切波速的试验研究[J].勘察科学技术,2003(4):15-19.(ZHANG Li, WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong. Study on field and laboratory test of shear wave velocity of soil specimen [J]. Site Investigation Science and Technology, 2003(4):15-19.(in Chinese))
- [11] 卢华喜,尚守平. 场地土最大动剪模量的室内外试验研究[J]. 公路, 2007(4): 1-4. (LU Hua-xi, SHANG Shou-ping. Laboratory and field test research on maximum dynamic shear modulus of site soil[J]. Highway, 2007(4): 1-4. (in Chinese))
- [12] 阮元成,陈宁,刘小生,等. 覆盖层土体最大动剪模量室内外试验比较分析[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 496-500.
 (RUAN Yuan-cheng, CHEN Ning, LIU Xiao-sheng, et al. Comparative analysis on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus of overburden layers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 496-500. (in Chinese))
- [13] 石兆吉,丰万玲. 土壤动压缩模量共振柱法测定[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(6): 25-32. (SHI Zhao-ji, FENG Wan-ling. Determination of dynamic compressive modulus using resonant column device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(6): 25-32. (in Chinese))
- [14] 徐存森, 吴俊壁. 用扭转单剪、共振柱仪测定空心试样土的动剪切模量[J]. 大坝观测与土工测试, 1992, 16(1): 37-43.
 (XU Cun-sen, WU Jun-bi. Determination of dynamic shear modulus of hollow soil sample using stokoe type torsional simple shear, resonant column device[J]. Dam Observation and Geotechnical Testing, 1992, 16(1): 37-43. (in Chinese))
- [15] 尚守平,卢华喜,任慧,等. 粉质黏土动剪切模量的试验对比研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 410-414. (SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, REN Hui, et al. Comparative study on dynamic shear modulus of silty clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 410-414. (in Chinese))

Experimental studies on dynamic characteristic parameters of covering layer of earth rockfill dam foundation

HE Liang^{1,2}, LI Guo-ying¹, YANG Jie¹

(1. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nuclear Industry Nanjing Engineering Investigation Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: By use of the indoor tests and field tests on dynamic characteristics of shear wave velocity, experimental studies on the maximum shear modulus parameters of the foundation soil layers of the earth rockfill dam of a hydropower station have been carried out. The shear wave velocity field tests were conducted by the single hole and cross-hole methods, and a total of four groups of the shear modulus with the depth curves were obtained. The curves are consistent with the depth of soil layer and their changes, namely, with the increase in depth, the more dense the soil shear modulus, the overall trend of change. In addition, the volatility of the data also reflects the impacts of the differences on the shear modulus of the soil. The indoor tests on soil consolidation ratio values, density values and impacts given by inhomogeneity of the soil under the wave velocity tests on the results from wave velocity tests and indoor tests are also discussed in this paper. The analysis results indicate that the density values and the inhomeqeneity of the soil are the main influence factors, and the consolidation ratio is the secondary. The research results show that the density values of the sample preparation are close to the actual soil layer, and the experiment values are close to the test values obtained from the field.

Key words: earth rockfill dam; dam foundation; dynamic characteristic test; shear wave velocity test; shear modulus