

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.010

坝料动残余变形特性试验

凌 华¹,傅 华¹,蔡正银¹,刘汉龙²

(1.南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210024;2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 :为研究筑坝材料的动残余变形特性,在大型动力三轴仪上进行了动残余变形试验.试验结果表明,残余体积变形随围压和动应力比的提高而增大,固结应力比(或应力水平)对残余体积变形的影响不大,残余剪切变形随围压和动应力比的提高而增大,受固结应力比的影响较大,随固结应力比的提高而增大.为反映不同固结应力比对残余剪切变形的影响,在沈珠江动残余变形模型的基础上提出了经验修正公式,讨论了残余剪切变形的影响因素,分析了小于 5 mm 粒径颗粒含量对动残余体积变形的影响.

关键词 :坝料,动应力,残余体积变形,残余剪切变形
中图分类号 :TU435 文献标志码 :A 文章编号 :1000-1980(2010)05-0532-06

土石坝的建设多位于我国西部地区,西部地区地质条件复杂,地震烈度高,一旦失事,将产生灾难性的后果.震害资料表明,土石坝的裂缝、震陷、滑坡等与地震的残余变形有关^[1].关于残余变形的研究成果近年较多^[2-3].

残余变形模型一般可分为两类:一类是仅考虑剪切变形的模型^[4-5],另一类是不仅考虑剪切变形,也考虑体积变形的模型^[6-8].工程学术界对永久变形预测中是否同时计入残余体积变形存有争议^[9].若不考虑残余体积变形,动力分析时相应的计算结果表明,地震后下游坝坡大量向外鼓出,坝顶的沉降小于水平位移,这与震后观测资料明显不符,特别是自由排水的堆石体在反复剪切作用下,棱角破碎严重,残余体积变形十分明显.因此对于土石坝工程设计与计算而言,后一类残余变形模型更符合实际情况^[6-7].

根据试验结果,分析了围压、固结应力比(或应力水平)和动应力对动残余剪切变形和动残余体积变形的影响,探讨了试样大小和小于 5 mm 粒径颗粒含量对动残余体积变形特性的影响规律.

1 实验简介

为减少缩尺效应的影响,试验在南京水利科学研究院大型动力三轴仪上进行.试样直径 300 mm,高 700 mm,最大允许粒径 60 mm.依据 SL 237—006《土工试验规程》,采用等量替代或等量替代和相似级配混合法进行级配缩制,具体试验试样级配及干密度见表 1.

表 1 试样密度与级配
Table 1 Densities and gradations of samples

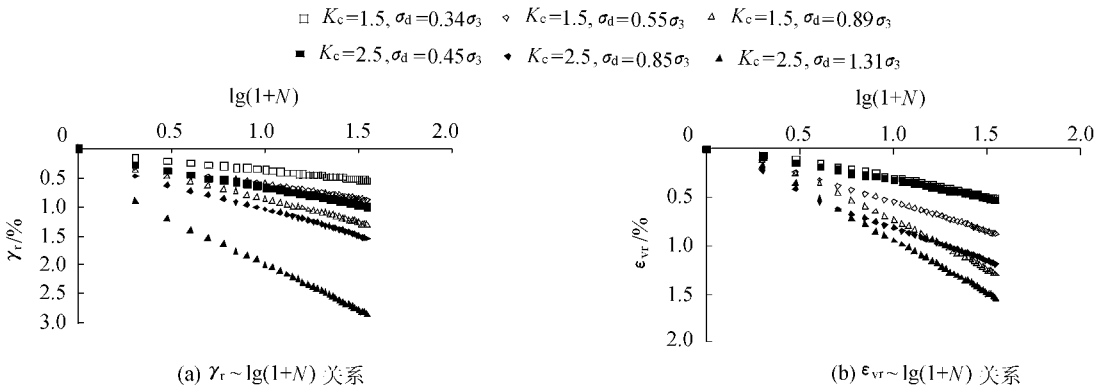
试样	母岩成分	干密度/ (g·cm ⁻³)	各粒径颗粒质量分数/%							
			60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.075 mm	<0.075 mm
过渡料	花岗岩	2.107	20.4	29.7	18.8	14.1	9.0	8.0		
下游堆石料	花岗岩	2.078	21.2	30.5	23.7	13.6	6.0	5.0		
反滤Ⅰ	花岗岩	2.033			6.0	8.0	16.0	40.0	28.0	2.0
覆盖层第③层	覆盖层砂砾料	2.170	22.0	24.4	18.1	11.7	21.8	1.5	0.4	0.1
坝基砂层	覆盖层砂砾料	1.520		0.1	0.2	0.2	0.7	13.6	50.1	35.1
心墙掺砾料	花岗岩	2.150	23.7	33.3	20.8	17.2	5.0			

注:心墙掺配比为 1:1(砾与土的质量比).

试验围压 σ_3 分别为 500 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa 和 2 500 kPa, 固结应力比 K_c 覆盖层第③层为 2.5, 砂层和心墙掺砾料为 1.5, 过渡料、下游堆石料、反滤 I 均分别为 1.5 和 2.5, 分别对其进行了动残余变形试验. 各初始应力状态下, 在排水条件下施加 2~3 级轴向循环荷载, 荷载频率为 0.1 Hz, 共 30 振次.

2 动三轴残余变形试验

在 σ_3, K_c 初始状态下($\sigma_3 = 1\,800\text{ kPa}$) 动应力 σ_d 作用下产生残余的剪切应变 γ_r 和体积应变 ϵ_{vr} 曲线见图 1 和图 2. 为清楚起见, 图中试验点为某振次的平均应变.



C_{vr} 和 C_{dr} 应是初始应力状态和动应力 σ_d 的函数.将 C_{vr} 和 C_{dr} 表示为第10振次下动剪应变幅值 γ_d 的函数.为表达清晰、方便计算,用应力水平 $S_1(\tau/\tau_f)$ 代替 K_c .本文建议的经验修正公式为

$$C_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2)$$

(3)

$$C_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_1^2$$

(4)

式中: c_1 —— $C_{vr} \sim \gamma_d$ 双对数关系曲线 $\gamma_d = 1\%$ 处的直线截距; c_2 ——拟合曲线的斜率; c_4 —— $C_{dr}/S_1^2 \sim \gamma_d$ 双对数关系曲线 $\gamma_d = 1\%$ 处的直线截距; c_5 ——拟合曲线的斜率.研究表明, S_1 对 C_{vr} 影响很小,故可假定 S_1 对 C_{vr} 无影响,即式(3)中的 $c_3 = 0$.当以10为底进行参数整理时, c_1 和 c_4 要乘以0.4343.确定模型参数后可用增量法计算动残余体积应变和残余剪切应变.

由试验结果整理得到的沈珠江动残余变形模型参数见表2,下游堆石料和反滤Ⅰ $\gamma_d \sim C_{vr}$ 曲线及 $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$ 曲线见图3和图4.

Table 2 Parameters for tests on dynamic residual deformation characteristics

试样	$c_1/\%$	c_2	沈珠江动残余变形模型		本文建议公式	
			$c_4/\%$	c_5	$c_4/\%$	c_5
过渡料	0.43	0.64	7.38	0.73	0.79	0.72
下游堆石料	0.68	0.76	9.55	0.56	1.05	0.81
反滤Ⅰ	0.21	0.57	7.82	0.33	0.76	0.59
坝基第③层	0.31	0.54	4.30	0.49	0.63	0.56
坝基砂层	0.1	0.49	27.80	0.58	1.59	0.74
心墙掺砾料	0.04	0.18	22.45	0.95	1.42	0.90

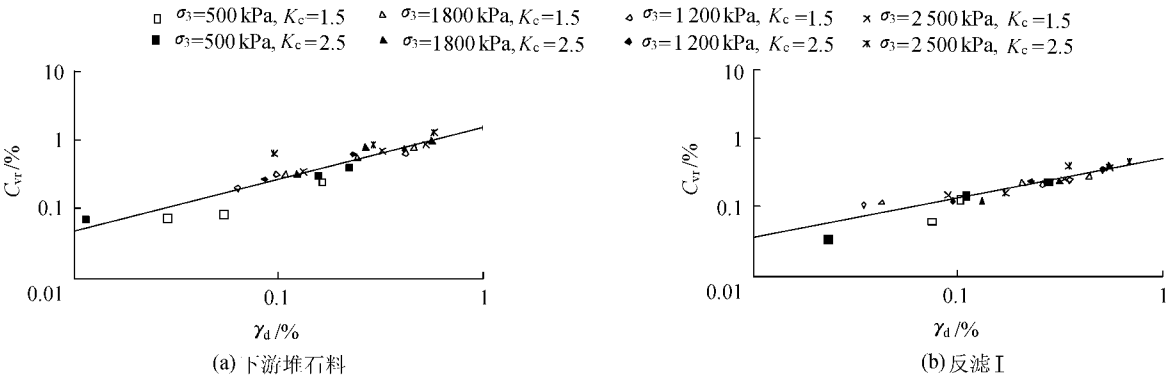


图3 $\gamma_d \sim C_{vr}$ 曲线
Fig. 3 Curves of $\gamma_d \sim C_{vr}$

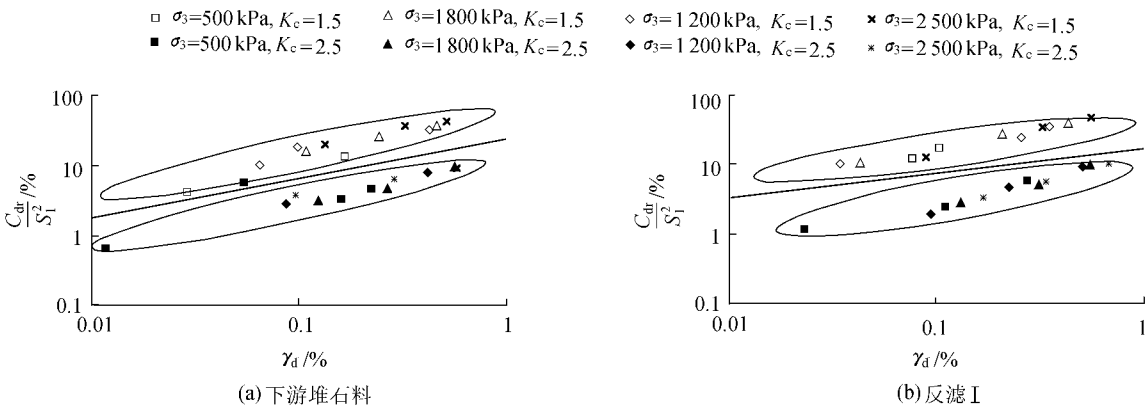


图4 $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$ 曲线
Fig. 4 Curves of $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$

由图3可见, S_1 对残余体积变形影响不大,式(3)能较好地反映试验结果.由图4可见,对于本文坝料试验结果,每个 K_c 情况下的 $\gamma_d \sim C_{dr}/S_1^2$ 曲线形成了2个狭长的带状体,式(4)不能很好地描述不同 K_c 下的动残余剪切变形情况,文献[9-10]也得出了类似的结论.

鉴于沈珠江动残余变形模型的突出优点,建议沿用式(4)的形式,采用式(5)描述残余剪切变形:

$$C_{dr} = c'_4 \gamma_d^{c'_5} (K_c - 1)^n$$

(5)

由式(5),等向固结时, C_{dr} 和 γ_r 为 0,这与已有的研究成果相符合. 固定指数 n 整理得到的 c'_4 和 c'_5 见表 3,表中 R 为相关系数. 由表 3 可见, n 在 0.4~0.6 范围内曲线拟合较好,建议 n 取 0.5. 当 n 取 0.5 时过渡料的拟合结果也比较理想. 下游堆石料和反滤 I $C_{dr}/\sqrt{K_c-1} \sim \gamma_d$ 曲线见图 5. 由图 5 可见,式(5)能较好地反映试验情况,其余各坝料和覆盖层的 c_4 和 c_5 见表 2. 在进行动力反映分析时原有计算程序仅略为修改即可进行动残余变形计算.

表 3 不同 n 时的 c'_4 和 c'_5

Table 3 Values of c'_4 and c'_5 under different values of n						
n	下游堆石			反滤 I		
	R	$c'_4/\%$	c'_5	R	$c'_4/\%$	c'_5
0.2	0.896	1.027	0.82	0.961	0.773	0.63
0.3	0.917	1.034	0.82	0.976	0.769	0.61
0.4	0.931	1.042	0.81	0.985	0.760	0.60
0.5	0.936	1.047	0.81	0.985	0.756	0.59
0.6	0.932	1.051	0.80	0.973	0.751	0.58
0.7	0.917	1.064	0.80	0.950	0.743	0.57
0.8	0.893	1.068	0.79	0.916	0.738	0.55

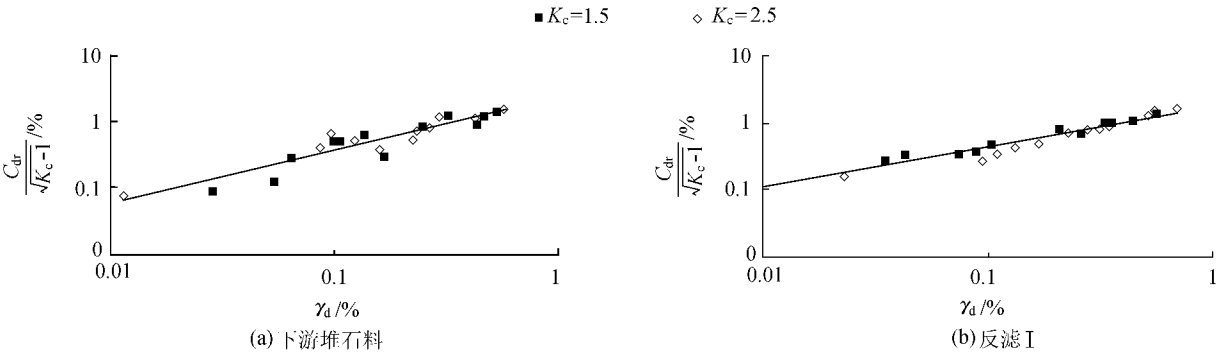


图 5 $C_{dr}/\sqrt{K_c-1} \sim \gamma_d$ 曲线

Fig. 5 Curves of $C_{dr}/\sqrt{K_c-1} \sim \gamma_d$

3 动力残余变形特性初探

3.1 动力残余体积变形特性分析

由图 1、图 2 和表 2 可见,对于残余体积变形,下游堆石料的 c_1 要大于过渡料和反滤 I,坝基第③层要远大于砂层,心墙掺砾料最小.这主要是因为级配和渗透特性引起的. SL 237—1999《土工试验规程》规定,在进行静力三轴压缩 CD 试验时,对于无黏性粗颗粒材料剪切速率为每分钟 0.1%~0.5%应变,黏质粗颗粒材料剪切速率仅为每分钟 0.012%~0.003%应变.这样规定,能通过剪切速率使试样在剪切过程中充分排水和消散超孔隙水压力.但是模拟地震情况的动力三轴试验要求在很短的时间内完成.无论是无黏性粗颗粒土还是黏质粗颗粒土甚至黏土,循环荷载施加时间基本相同.如本文试验每级动应力 30 振次,频率为 0.1 Hz,动应力施加过程为 300 s.因此对于非自由排水体,即使上下排水阀门都已打开,若不能充分排水,仍然会产生超孔隙水压力,这是导致砂层、心墙掺砾料和反滤 I 产生的动残余体积变形远小于下游堆石料和坝基第③层的原因之一.

国内动力试验一般试样最大允许颗粒粒径仅为 60 mm,因此室内试验时首先应对坝料进行级配缩制.缩尺效应使室内试验成果与现场实际坝料力学特性之间存在差异^[11].已有研究表明,小于 5 mm 颗粒质量分数 P_5 是影响土料力学性能的重要参数^[12]. P_5 对动力残余体积变形的影响如图 6 所示.图 6 表明,随着 P_5 的增加,残余体积变形明显减小.目前坝体填筑材料的最大允许颗粒粒径已经提高至 1 000 mm,造成了试验级配没有设计级配优良,最大颗粒粒径减小, P_5 要有所增加.也就是说,一般室内试验得出的残余体积变形要比现场原位土体的残余体积变形小.

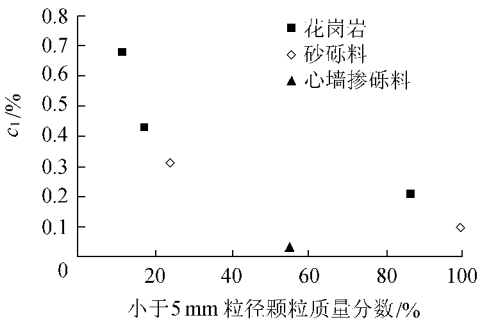


图 6 P_5 对残余体积变形的影响

Fig. 6 Effect of P_5 on residual volume deformation

3.2 动残余剪切变形特性分析

心墙掺砾料和砂层的渗透系数低,在动残余变形试验过程中,孔隙水压力仅能部分消散,产生了动孔隙水压力,导致残余剪切变形较大。过渡料、下游堆石料和反滤Ⅰ母岩成分相同,其动残余剪切变形相差不大,但出现了粗颗粒质量分数最大的下游堆石料 c_4 最大这一现象。这些都表明动残余剪切变形的影响因素众多,除了围压、固结应力比和动应力,还包括了母岩特性、密度、级配、粗细颗粒质量分数等。这些影响规律应依据大量试验,进行进一步研究。

4 结 论

a. 动残余体积变形随围压和动应力比的提高而增大,固结应力比(或应力水平)对体积变形的影响不大,动残余剪切变形随动应力比、围压的提高而增大,与残余体积变形不同,动残余剪切变形受固结应力比的影响较大,随固结应力比的提高而增大。

b. 对沈珠江动残余变形模型关于残余剪切变形的内容,提出了经验修正公式,以反映不同固结应力比情况下的残余剪切变形特性。

c. 初步探讨了残余体积变形和剪切变形的影响因素。另外试验结果也表明,残余体积变形随着 P_5 的增大呈现变小的规律。

参考文献:

- [1] 王昆耀,常亚屏,陈宁.往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J].土木工程学报,2000,33(3):48-53.(WANG Kun-yao,CHANG Ya-ping,CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soils under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(3):48-53.(in Chinese))
- [2] 陈存礼,何军芳,胡再强,等.动荷作用下饱和尾矿砂的孔压和残余应变演化特性[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):4034-4039.(CHEN Cun-li,HEN Jun-fang,HU Zai-qiang,et al. Developing characteristics of pore water pressure and residual deformation of tailing sands under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(Sup2):4034-4039.(in Chinese))
- [3] 阮元成,郭新.饱和尾矿料动力变形特性的试验研究[J].水利学报,2003(4):24-29.(RUAN Yuan-cheng,GUO Xin. Experimental study on dynamic deformation properties of saturated tailings material[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(4):24-29.(in Chinese))
- [4] 孔宪京,韩国成.粗粒料动应力-应变关系试验研究[R].大连:大连理工大学,1994.
- [5] 贾革续,孔宪京.粗粒土动残余变形特性的试验研究[J].岩土工程学报,2004,26(1):26-30.(JIA Ge-xu,KONG Xian-jing. Study on residual deformation characteristics of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(1):26-30.(in Chinese))
- [6] 沈珠江,徐刚.堆石料的动力变形特性[J].水利水运科学研究,1996,19(2):143-150.(SHEN Zhu-jiang,XU Gang. Deformation behavior of rock material under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering,1996,19(2):143-150.(in Chinese))
- [7] 迟世春,林皋,孔宪京.堆石料残余体应变对计算面板堆石坝永久变形的影响[J].水力发电学报,1998,19(1):59-67.(CHI Shi-chun,LIN Gao,KONG Xian-jing. Influence of residual volumetric strain of rockfill material on calculated permanent deformation of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,1998,19(1):59-67.(in Chinese))
- [8] 阮元成,陈宁,常亚屏.察汗乌苏水电站坝体料残余变形特性试验研究[J].水利水电技术,2004,35(10):75-77.(RUAN Yuan-cheng,CHEN Ning,CHANG Ya-ping. Experimental study on the residual deformation properties of fill materials for the concrete-faced dam of Chahanwusu Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2004,35(10):75-77.(in Chinese))
- [9] 郭兴文,王德信,燕立群,等.水布垭混凝土面板堆石坝地震永久变形分析[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(6):56-60.(GUO Xing-wen,WANG De-xin,YAN Li-qun,et al. Analysis of earthquake induced permanent deformation for high concrete face rockfill dam[J]. Journal of Hohai University:Nature Science,2001,29(6):56-60.(in Chinese))
- [10] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等.堆石料残余变形特性研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):808-812.(ZOU De-gao,MENG Fan-wei,KONG Xian-jing,et al. Residual deformation behavior of rock-fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(6):808-812.(in Chinese))
- [11] 郦能惠,朱铁,米占宽.小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J].水电能源科学,2001,19(2):39-42.(LI Neng-hui,

ZHU Tie ,MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi Dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy 2001 ,19(2) 39-42.(in Chinese))

[12] 饶锡保 ,何晓民 ,刘鸣.粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J].长江科学院院报 ,1999 ,16(1) :21-25(RAO Xi-bao ,HE Xiao-min ,LIU Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soil[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute ,1999 ,16(1) 21-25.(in Chinese))

Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials

LING Hua¹ , FU Hua¹ , CAI Zheng-yin¹ , LIU Han-long²

(1. Department of Geotechnical Engineering , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China ;
2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Tests were performed to investigate the dynamic residual deformation characteristics of dam materials by use of a large scale triaxial test apparatus. The results show that the dynamic residual volume deformation increases with the increase of confining pressure and dynamic stress ratio. The consolidated stress ratio(or stress level) has little effect on the residual volume deformation. The dynamic residual shear deformation increases with the increase of confining pressure and dynamic stress ratio , and it is greatly influenced by the consolidated stress ratio and increases with the increase of the consolidated stress ratio. A modified formula based on Shen Zhu-jiang 's model was proposed to depict the effect of various consolidated stress ratios on the residual shear deformation. The influencing factors for the residual deformation were discussed. The effect of content of particles smaller than 5 mm on the dynamic residual volume deformation was analyzed.

Key words : dam material ; dynamic stress ; residual volume deformation ; residual shear deformation