

水库坝壳料动静大三轴试验研究

王天恒

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆昌吉, 831100;

摘要: 本文通过系统的静、动力三轴试验, 确定了坝壳砂砾料的关键力学参数与变形特性。静力试验表明, 其固结排水剪强度参数为: 黏聚力 $C_{cd}=125.7\text{kPa}$, 内摩擦角 $\phi_{cd}=40.2^\circ$ 。动力特性试验揭示了动弹性模量比与阻尼比随动应变的典型变化规律, 即动弹性模量比随动应变增大而减小, 阻尼比则随之增大。此外, 通过固结排水循环加载试验, 获得了残余体积应变与剪切应变随振动次数的关系曲线, 为坝体的动力永久变形分析提供了必要的计算模型参数。

关键词: 坝壳料; 静三轴; 动三轴; 动弹性模量

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.056

1 基本情况

本水库工程主要任务是灌溉、供水。最大坝高为55m, 正常蓄水位为2371m, 总库容3256万 m^3 , 死库容为1300.5万 m^3 , 兴利库容为1568.5万 m^3 ; 工程规模为III等中型, 其中主要建筑物拦水坝、泄洪冲沙兼导流洞、放水洞、溢洪洞为3级建筑物, 次要建筑物为4级, 临时建筑物为5级。本次以水库坝壳料为研究对象, 分析筑坝材料静力学和动力学特性, 确定砂砾料的抗剪强度参数和非线性模型以及弹塑性模型的计算参数, 为水库计算模型提供试验参数。

2 试验方法及内容

本项目以《土工试验方法标准》、《粗粒土试验规程》等规程规范为依据^[1-4], 在通过对新疆克州乔诺水库工程筑坝材料进行静动力试验, 研究筑坝材料的力学性能并为有限元数值分析提供计算参数:

(1) 静力大型三轴 CD 试验

试验材料为: 坝壳砂砾料(C1料场砂砾料)。围压4级: 200、400、600、800kPa。

通过测定砂砾料在不同恒定周围压力下, 主应力差和轴向应变以及轴向应变和体积应变的关系。

(2) 动力大型三轴试验

试验材料为坝壳砂砾料(C1料场砂砾料)。围压3级: 200、400、800kPa, 固结比采用2.0。

试验内容包括:

①坝料动力应力变形特性。通过试验, 测定材料在

动应力作用下的动应力和动应变的关系曲线, 确定最大动剪切模量 G_{max} 与有效固结压力的关系、动剪切模量 G_d/G_{max} 和阻尼比 λ 与动剪应变的关系, 整理动力计算的模型参数。

②坝料动力残余变形特性。通过饱和固结排水动力三轴试验, 测定材料在不同动荷载作用下残余剪应变、残余体应变与振次之间的关系曲线, 确定在一定振次下动应力与残余剪应变、动应力与残余体应变之间的关系, 为地震残余变形计算提供依据, 并整理有关计算模型的参数。

3 试验设备

静动力三轴试验设备为高精度 DJSZ-150 型三轴试验机。仪器的特点是精度高、操作方便, 功能齐全。主要技术指标如下:

- (1) 最大轴向静态荷载: 1500kN, 轴向力分辨率: 0.1kN;
- (2) 最大轴向动荷载: 300kN, 轴向力分辨率: 0.1kN;
- (3) 动向负荷示值波动度: $\pm 1\sim 5\%$ F.S;
- (4) 轴向激振频率范围: 0.01~5Hz (正弦波), 0.1~5~100Hz (任意波), 振动幅度 (位移): 0~3mm;
- (5) 最大油缸行程: 300mm;
- (6) 位移测量范围: 0~300mm, 位移分辨率: 0.001mm, 位移测量精度: 0.3%F.S;
- (7) 应变式轴向加载速率: 0.01~3mm/min;
- (8) 周围压力: 0~4MPa; 孔隙水压力: -0.1~4MPa;

反压力：0~1MPa；压力测量精度：±0.5%F.S；压力分辨率：0.001MPa；

(9) 控制方式：可选择力（应力）、位移（应变）等多种控制方式。

4 相对密度试验结果和制样干密度

对坝壳砂砾料分别进行比重、相对密度试验。试验控制密度：对坝壳砂砾料采用相对密度为0.85时对应的干密度进行控制。试验成果见下表：

表1 各试验用料物理性质及制样干密度

试验用料	比重			最小干密度	最大干密度	控制密度 (Dr=0.85)
	>5	<5	加权平均值			
	—			g/cm ³		
坝壳砂砾料	2.72	2.71	2.72	1.83	2.30	2.215

5 静力三轴试验结果

按照试验设计的级配要求，将试料按五层分别称量配制，之后加入适量水充分搅拌均匀，并静置湿润2小时。每一层料分五次填入成型筒，确保大小颗粒均匀分布，逐层插捣并以击锤振实，直至达到设定的控制干密度。

完成试样成型后，卸除成型筒，将试样移入加载架。

对已制备的试样抽真空40至60分钟（具体时间视试料情况调整），随后采用从底部进水、由下至上逐步饱和的方式使试样充分饱和，饱和度控制在98%~100%。之后施加预定围压，保持围压恒定进行排水固结。

剪切阶段依据试验条件确定是否开启排水阀。以每分钟0.1%~0.5%的应变速率施加剪切，同时在剪切过程中记录轴向压力计、轴向位移计及体变管的读数。

三轴压缩试验成果详见表2。

表2 三轴压缩试验成果表（固结排水CD）

试验用料名称		干密度	抗剪强度指标				E~B(μ)模型参数							
			C _{cd}	φ _{cd}	φ ₀	Δφ	k	n	k _b	m	R _f	G	F	D
		g/cm ³	kPa	°										
坝壳料	C1料场砂砾料	2.215	125.7	40.2	50.6	9.4	1053	0.44	611	0.1	0.77	0.36	0.07	7.17

6 动力三轴试验结果

6.1 动弹模量与阻尼比

遵照试验级配要求，将试料分为五层分别称量配料，随后加入适量水分充分搅拌，并静置湿润两小时。每一层试样分五次填入成型筒，确保粗细颗粒分布均匀，逐层进行插捣并用击锤振实，直至达到预设的干密度控制标准。

试样成型后卸除成型筒，将其推入加载架。对成型试样进行抽真空处理，持续40至60分钟（依据试料性质调整），随后采用底部进水、由下至上逐步饱和的方法使试样达到98%~100%的饱和度。施加设定的围压，

并在围压保持不变的条件下完成排水固结。本次试验固结比K_c设定为2.0，在等压固结稳定后，再逐步施加轴压，以避免试样产生过大变形。饱和试样在固结压力下固结完成后，关闭排水阀并记录固结排水量。

在围压（设定为200、400、800 kPa）保持恒定的情况下，自小至大逐级施加轴向正弦动荷载，每级荷载振动3周，激振频率为0.33 Hz，固结比K_c为2.0。试验过程中通过计算机实时采集每一级动荷载作用下的应力-应变滞回曲线及相关数据。

(1) 动剪切模量比和阻尼比与动应变的关系（如表3）

表3 动剪切模量比和阻尼比与动剪应变关系表

坝壳砂砾料								
$\sigma_3=200\text{kPa}$			$\sigma_3=400\text{kPa}$			$\sigma_3=600\text{kPa}$		
γ_d (%)	G_d/G_{dmax}	λ (%)	γ_d (%)	G_d/G_{dmax}	λ (%)	γ_d (%)	G_d/G_{dmax}	λ (%)
0.002	0.975	2.38	0.003	0.973	2.36	0.002	0.985	2.30
0.004	0.946	3.07	0.006	0.944	3.27	0.005	0.961	2.89
0.006	0.910	4.01	0.008	0.921	4.16	0.009	0.934	3.50
0.010	0.855	5.00	0.014	0.876	5.54	0.020	0.869	5.22
0.020	0.756	6.77	0.027	0.784	6.98	0.036	0.784	6.34
0.029	0.683	7.96	0.041	0.703	8.75	0.058	0.693	8.25
0.040	0.608	9.28	0.061	0.612	10.21	0.087	0.599	10.05
0.069	0.474	11.87	0.102	0.486	12.52	0.134	0.493	11.96

(2) 系数值 (如表4)

表4 系数值

试料名称	K_c	k_2'	k_2	n	k_1'	k_1	λ_{max}
坝壳砂砾料	2.0	5117	1924	0.47	38.4	28.9	0.24

6.2 残余变形

装样、饱和及固结过程同动弹模量与阻尼比试验, 固结比采用2.0。

在保持周围压力(围压采用200、400、800)不变

的情况下, 施加轴向正弦动荷载, 动应力比采用0.3、0.6、0.95, 振动30周, 激振频率为0.1Hz。电脑即时采下在每一级振动力作用下的应力-应变及数据。试验成果详见表5。

表5 残余变形参数

材料名称	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	c_1 (%)	c_2	c_3	c_4 (%)	c_5
坝壳砂砾料	2.215	0.78	0.96	0	6.96	1.00

7 结论

(1)静力三轴压缩试验: 坝壳砂砾料固结排水剪 $C_{cd}=125.7\text{kPa}$ 、 $\phi_{cd}=40.2^\circ$ 。

(2)在动力三轴试验中, 通过对坝壳砂砾料进行测定, 揭示了动弹性模量比、动剪切模量比以及阻尼比与动应变之间的变化规律。试验结果表明, 随着动应变的增大, 动弹性模量比逐渐减小, 而阻尼比则相应增大。通过对坝壳砂砾料进行固结排水循环加载试验, 查明了残余体积和剪切应变与振次的关系, 为永久变形计算提供模型参数。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国

国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[2] 中国水利学会. 粗粒土试验规程: T/CHES 29-2019[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[3] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990;

[4] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

作者简介: 王天恒(1995.02-), 男, 汉族, 新疆乌鲁木齐, 本科, 工程师, 研究方向: 现从事水利试验检测。