

# 小浪底大坝防渗土料质量指标及现场质量控制

梁会圃 皇甫行丰

葛勇

(河南省地矿局第一水文地质工程地质队, 新乡 453002) (黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 郑州 450003)

**【摘要】** 黄河小浪底水利枢纽是黄河治理与开发的重要枢纽工程。根据坝址区地质条件, 大坝采用了有内铺盖的壤土斜心墙堆石坝, 防渗土料的施工质量控制对大坝的质量和运行安全具有重大意义。对大坝防渗土料的质量指标、现场质量控制进行了分析总结。

**【关键词】** 防渗土料; 质量控制; 级配曲线; 核子仪

**【中图分类号】** TU 413

## Analysis for the Quality Target and Quality Control of Impervious Earth of Xiao Langdi Dam

**【Abstract】** Yellow River Xiao Langdi water control project is an important project about the regulation and development of Yellow River. Because of the geology condition of the dam address, the Soil-Stone dam is adopted. Therefore, the construction quality control of impervious earth is essential for the quality and secure running of the dam. The quality target and the spot quality control of impervious earth are analyzed.

**【Key words】** soil impervious to permeate; quality control; curve of grade; nucleonic apparatus

### 0 引言

小浪底水利枢纽为带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝, 主坝防渗土料需 1 116 万 m<sup>3</sup>, 取土采自右岸的寺院坡料场和小浪底料场, 防渗土料的施工质量控制对大坝的质量和运行安全具有重大意义。

### 1 防渗土料质量指标

#### 1.1 防渗土料分区及工程量

主坝防渗土料分为五区: 1 区心墙土料共

820 万 m<sup>3</sup>; 1A 高塑性土区约 1 万 m<sup>3</sup>, 位于混凝土防渗墙顶部; 1B 区上游围堰斜墙土料 150 万 m<sup>3</sup>; 5 区内铺盖掺和料 45 万 m<sup>3</sup> 和 10 区上游铺盖 100 万 m<sup>3</sup>。

#### 1.2 1 区心墙土料

心墙土料全部采自右岸寺院坡料场, 勘探储量 2 500 万 m<sup>3</sup>, 主要为重粉质壤土和中粉质壤土。

(1) 物理指标: 寺院坡土料场中、重粉质壤土物性指标见表 1。

表 1 寺院坡土物理性质指标

土料	粒径( <i>d</i> /mm)的颗粒级配( <i>w<sub>B</sub></i> )/%				液限 <i>w<sub>L</sub></i> /%	塑限 <i>w<sub>P</sub></i> /%	塑性指数 <i>I<sub>p</sub></i> /%	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水量 <i>w</i> /%	渗透系数 <i>k/(cm \cdot s^{-1})</i>
	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005						
重粉质壤土	1	8	66	25	36.2	21.8	14.4	1.95	20.0	$6.14 \times 10^{-7} \sim$
中粉质壤土	1.6	8.8	72	17.6	32.3	20.9	11.4	1.77	20.0	$4.26 \times 10^{-9}$

(2) 击实性能: 设计过程中按照 SDS01—79、SD128—84 和 GBJ123—88 三种土工实验

规程规定的击实试验标准对重粉质壤土和中粉质壤土分别进行击实试验, 其结果见表 2。

表 2 不同击实功能击实试验结果

土料名称	试验规程	标准击实功能 ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )	击数	组数	最大干重度 $\gamma_{d\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		最优含水量 $w_{op}/\%$	
					范围值	平均值	范围值	平均值
重粉质壤土	SDS01-79	864	25	49	16.3~17.9	16.96	15.8~21.3	16.82
	SD128-84	607.5	27	6	16.6~17.2	16.82	18.0~19.6	18.66
	GBJ123-88	591.6	25	18	16.1~17.6	16.76	15.8~18.5	19.82
中粉质壤土	SDS01-79	864	25	31	16.3~17.9	17.10	14.5~21.3	16.96
	SD128-84	607.5	27	1	16.8		17.5	
	GBJ123-88	591.6	25	13	16.3~17.6	16.90	16.0~20.2	18.71

寺院坡土料场中重粉质壤土储量(质量分数)占 70% 以上,轻粉质壤土储量(质量分数)不足 10%,三种土混合后,重粉质壤土仍占绝大部分,据此确定 1 区心墙土料的设计干重度为  $16.9 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,相应最优含水量 18.6%。

鉴于小浪底大坝的重要性,确定压实度为  $1.0^{\text{①}}$ 。对一般压实区的填筑要求是:填筑层厚(压实后) 0.25 m,用凸块震动碾碾压至少 6 遍,使其干密度等于或大于按美国 ASTM D698 标准普氏击实试验获得的最大干密度的 100%。

### 1.3 1B 区土料

根据低料低用、就近采料原则,上游拦洪围堰 1B 区斜墙土料场选在坝址上游右岸 1~2 km 的小浪底料场,该土料场主要为中粉质壤土<sup>[1]</sup>,平均粘粒质量分数为 17.4%,塑性指数为

6。根据击实试验结果,确定设计干重度  $17.8 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,相应最优含水量 15.0%。

施工时右岸滩地斜墙土料采自小浪底料场,截流后主河床部分堰体斜墙土料采自寺院坡料场。斜墙填筑层厚 0.25 m(压实后),其压实密度应等于或大于按标准普氏击实试验后获得的最大干密度的 100%。

### 1.4 1A 区土料

1A 区位于主坝防渗墙顶,为高塑性土区。墙顶设置高塑性土区主要为缓解墙顶以上土体与墙两侧土体的不均匀沉降,改善墙顶土体及防渗墙的应力状态。

1A 区土料采自右岸距坝约 13 km 的会厘沟料场,为粉质粘土,其物理性质指标见表 3,典型土样的压缩试验结果见表 4。

表 3 会厘沟土料物理性质指标

土料名称	粒径( $d/\text{mm}$ )的颗粒级配( $w_B$ )/%					液限 $w_{L}/\%$	塑限 $w_{p}/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水量 $w/\%$
	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005					
姜黄色粉质粘土	6	5	50	39	21	59	29	30	20.2	22.3
棕色粉质粘土	6	4	55	35	20	49	26	23	20.1	22.6
平均	0.1	3.8	6.5	55.1	35.5	52.5	28.3	24.2		

表 4 会厘沟土料典型压缩试验结果

土样编号	干重度 $\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	各压力段的压缩系数 $a/(\text{10}^{-3} \text{ kPa}^{-1})$ (压力单位: 100 kPa)						
		1~2	2~4	4~6	6~8	8~12	12~16	16~20
586-7-461	14.7	0.15	0.20	0.18	0.14	0.10	0.07	0.06
		0.17	0.21	0.17	0.13	0.10	0.07	0.06
	15.5	0.05	0.05	0.10	0.12	0.09	0.06	0.05
		0.13	0.19	0.13	0.10	0.09	0.06	0.05

①水利部黄委会设计研究院.小浪底水利枢纽工程第一标主坝招标文件第二卷技术规范.1993

续表

土样编号	干重度 $\gamma_d / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	各压力段的压缩系数 $a' / (10^{-3} \text{kPa}^{-1})$ (压力单位: 100 kPa)						
		1~2	2~4	4~6	6~8	8~12	12~16	16~20
568-7-462	15.5	0.17	0.19	0.16	0.13	0.10	0.07	0.05
		0.15	0.21	0.18	0.12	0.10	0.06	0.05
	16.0	0.06	0.09	0.11	0.10	0.10	0.07	0.05
		0.15	0.13	0.13	0.11	0.09	0.06	0.05

为保证高塑性土区具有良好的塑性和适应变形能力, 确定压实度为 0.90~0.95, 填筑含水量应高于最优含水量+1%~+3%。

### 1.5 5区掺和料

为改善大坝上游坡的稳定性, 并尽量降低在地震作用下内铺盖内的孔隙水压力, 故内铺盖采用掺和料, 该料由质量分数 30% 的 1 区土料和质量分数 70% 的小于 60 mm 的砂砾石掺和而成。砂砾石级配见表 5。

表 5 掺和料中砂砾石级配

级配曲线	粒径( $d$ /mm)的颗粒级配( $w_B$ )/%				
	60~40	40~20	20~10	10~5	<5
上包线	10	17	9	10	54
下包线	26	20	11	6	37
平均线	18	18.5	10	8	45.5

5 区料碾压后填筑层厚 0.25 m, 至少碾压 4 遍, 使其干密度等于或大于 ASTM D698 标准普氏击实试验所获得的最大干密度的 100%。

### 1.6 防渗土料的级配曲线

为便于施工控制, 并保证所有填筑土料性质均一, 1 区、1A、1B 和 5 区土料均给出了相应级配曲线, 要求大坝土料的级配应在规定的包线范围内。

## 2 防渗土料现场质量控制

### 2.1 填筑现场质量控制

1 区土料(及 1B 区土料) 采自良沟、后围园和李家坡料场, 土料的天然含水量合适, 但土料特性存在较大的差别, 因此按料性不同对料场进行了具体分区, 并结合现场填筑面分区来开采土料, 以保持同一填筑区每层土料的均

匀性, 同时也便于确定控制参数和上坝土料相适应。

防渗土料填筑时层间的良好结合是现场控制的重点。雨后要认真学习清理不合格湿土, 检测土料的压实度和含水量, 满足要求方可上料填筑; 在夏季, 已压实土料表面水分损失很快, 因此重视经常洒水湿润并辅以适当刨毛; 冬季当气温低于 0℃ 时, 对出现的表面冻土和表面风干土层一律清除出坝外。施工过程中对出现的弹簧、剪切破坏土层一律进行返工处理<sup>[2]</sup>。多次挖坑检查表明各层土料层间结合良好。

在截流后填筑 1B 区土料时对右岸部分已填坝体施工缝削坡后检测发现含水量偏低, 主要是小浪底料场土质为轻、中粉质壤土, 粘粒质量分数和天然含水量偏低, 并且保水性差, 为此, 现场采取了在披面上挖坑浸水的方法以增加坡面含水量。实施结果有所改善, 含水量虽部分不满足要求, 但压实度均大于 100%, 开挖检查表明新老土层结合良好, 没有发现坡面上出现裂缝的情况。

规范虽然没有对 5 区混合料的含水量作出明确规定, 但仍坚持在上料前对成品料进行含水量测试, 据测试结果做好含水量的调节工作。对填筑过程中出现的弹簧、剪切破坏等一律进行返工处理。

### 2.2 质量控制手段及检测结果

#### (1) 防渗土料试验标准及检测方法

在土料填筑的质量控制中, 1996 年 7 月以前采用阶段过渡性的控制标准, 按美国标准 ASTM D698 普氏最大干密度的单值, 采用中国标准 SD128—84 规定的环刀法、美国标准

ASTMD1556 灌砂法对压实后的土料平行测试来进行压实度控制。1996年4月份开始在现场使用核子仪对压实后土料进行干密度、含水量测试。按环刀法和灌砂法已有的试验结果取平均值,对核子仪测试结果进行校正,并采用三种方法、四种仪器(环刀、灌砂及两种型号核子仪)进行为期15d的联合测试,以比较各种方法的测试结果及相关性。同时,也进行了标准槽试验率定核子仪的工作。比较上述各试验方法结果,灌砂法、核子法与标准槽的试验结果较接近,相关性好。

1996年7月2日确定了土料填筑质量控制标准:

1) 现场用灌砂法作为土料填筑质量的评定标准,以便和规范要求一致;

2) 针对土料性质变化大的情况,可以采用三点或五点的标准普氏击实参数定期移动平均,作为土料压实控制参数,压实度应符合规范要求;

3) 采用核子仪在现场测试进行质量控制,同时应定期采用灌砂法和标准槽的试验结果对核子仪进行率定;

4) 强调承包商要切实作好料场的勘探、计划、开采、含水量调节及相关的试验工作。

对特殊部位(蛙夯压实区)的土料,从1996年9月13日起,采用压实后的干密度应大于或等于根据实际上坝土料含水量(满足规范规定的含水量)从标准普氏击实曲线上查得的相应干密度值的100%。5区混合料的现场密度试验采用美国标准ASTMD5030所规定的灌水法。规范只规定临近基岩面区域填筑的5区混合料需采取专门压实机压实,并要求压实之后的干密度不得小于按美国标准ASTMD698所规定的标准普氏击实试验中得到的最大干密度的100%。对其它地方的5区混合料填筑,依据现场碾压试验结果,仅要求用规定的光面振动碾压4遍即可,没有压实度要求。由于设计的5区料与岸坡接触区之间均有1.0m厚的1区蛙夯区,因此5区料填筑区实际上不存在

采用专门压实机械压实的地方。

(2) 防渗土料的质量检测结果及分析评价

1) 1区土料

到1999年5月底,1区土料共填筑557.3万 $m^3$ ,其中1997年4月至1999年5月底共填筑1区土料400.9万 $m^3$ 。在填筑作业过程中,XECC 实验室根据规范对1区土料进行控制试验281次,记录试验13134次。试验次数已远远超过了规定的试验次数。

控制试验结果表明,1区土料的粘粒质量分数最低为17%,与设计下包线一致;最高为45%,比设计上包线高17%;平均为33%,比设计平均高10%。颗分试验资料表明,良沟、后苇园料场的土料 $d < 0.005$  mm 颗粒质量分数超出合同包线的占80%, $d < 0.002$  mm 颗粒质量分数几乎全部超出合同包线。现场土料压实区域,按照填筑分区及机械作业方式,分为凸块碾压实区和蛙夯压实区,相应的现场试验检测也分为凸块碾压实区试验检测及蛙夯区试验检测。根据已有的普氏击实试验结果及三点移动法结果,蛙夯区控制最大干密度为1.53(相应 $w_{op}$ 为23.4%)~1.671 $g/cm^3$ (相应 $w_{op}$ 为19.6%);凸块碾压实区最大干密度为1.632(相应 $w_{op}$ 为21.8%)~1.762 $g/cm^3$ (相应 $w_{op}$ 为16.8%)。根据1区土料压实后现场记录试验结果,13134个试样中,实测干密度最小为1.632 $g/cm^3$ (相应含水量为23.5%),最大为1.844 $g/cm^3$ (相应含水量为14.23%),平均干密度1.717 $g/cm^3$ ,压实度均在100%以上,合格率为100%。另外,根据现场测试结果,1区土料含水量一般都在规范允许的范围内(含水量为普氏最优含水量的一1%~+2%之间),仅有个别试样的含水量超出规范规定范围,但偏差值一般不超过1%。这充分反映了土料场天然含水量接近土料普氏最优含水量的特点。

上述试验资料的统计分析表明,1区土料质量较好,防渗性能优越,是一种较好的坝体

(下转第356页)

## 7 结论

弓上水库坝基高压喷射灌浆防渗工程于1999年完成,经过近两年的运行证明采用高压喷射灌浆防渗技术处理是成功的,该工程于2001-12-26通过了省、市验收,并被评为优良工程。本项研究于2002-03-31通过了河南省科学技术厅组织的成果鉴定,认为该项成果整体处于国内先进水平,在解决深达83 m高喷灌浆工艺方面有所创新,属国内领先地位。

弓上水库垂直防渗工程无论从施工深度、

处理的难度以及工序的复杂性均属国内罕见。通过试验研究,加重钻机自重、在粘土心墙中少量加水湿钻并下套管,靠钻杆自重不加压钻进等措施,保证了钻孔的垂直度,避免了粘土心墙的开裂破坏等问题,突破了高压旋喷墙在国内60 m深度的上限。高喷灌浆技术成功地解决了弓上水库的坝基渗漏问题,并节约了大量投资,有着显著的经济效益,具有广阔的推广前景。

收稿日期:2002-07-23

(上接第329页)

防渗材料;另一方面,土料施工工艺可行,压实质量好,满足规范对1区土料压实度的要求。

### 2) 上游围堰 1B 区土料

到1999年5月底,1B区土料共填筑144.0万 $m^3$ 。其中1997年4月至1999年5月底,1B区土料填筑82.3万 $m^3$ 。上游围堰1B区土料,1997年度改用1区土料料源。XECC试验共作控制试验63次,记录试验2419次。试验次数已远远超过规范规定的试验次数。根据普氏试验结果及三点移动法结果,1B区土料控制最大干密度为1.656( $w_{op}$ 为20.7%)~1.822 $g/cm^3$ ( $w_{op}$ 为14.5%)。

现场试验所检测的2419个试样,压实度均在100%以上。现场压实最小干密度为1.643 $g/cm^3$ (含水量为22%),最大为1.894 $g/cm^3$ (含水量15%),平均压实干密度大于1.710 $g/cm^3$ 。由此可见1B区压实质量是好的,满足规范要求。

### 3) 1A 高塑性区

防渗墙顶部1A区土料,右岸部分自1996年8月16日填筑开始至1996年11月份填至设计高程EL.149.0 m,共填筑土料2386 $m^3$ ;左岸部分自1998年5月开始至1998年10月填筑至设计高程EL.149 m,共填筑土料9294 $m^3$ 。1998年填筑期间,XECC试验室根据规范要求,共作控制试验3次,普氏击实试验3次(现

场仅采用了两个控制指标),记录试验90次。

1A料的级配曲线均在规范规定的设计包线之内,满足规范要求。根据普氏击实试验结果,1A料的控制最大干密度为1.606~1.61 $g/cm^3$ ,相应最优含水量为21.8%~21.4%。规范要求每层1A料的压实度在90%~95%之间。记录试验结果表明1A料的压实度均在90%~95%之间,压实前的含水量为22.4%~25.3%,均在规范规定的范围内(为最优含水量的+1~+3%)。1A土料填筑质量完全满足规范要求。

### 4) 5 区混合不透水料

到1999年5月底,共填筑5区混合料53万 $m^3$ ,其中1997年4月至1999年5月底填筑5区混合料32万 $m^3$ ,填筑过程中,XECC试验室共作控制试验129次,记录试验110次。5区料压实最大干密度为2.40 $g/cm^3$ ,最小干密度为2.05 $g/cm^3$ ,含水量为10%左右。上述结果表明5区料满足规范要求。

## 参 考 文 献

- 1 唐大雄,孙素文. 工程岩土学. 北京:地质出版社, 1987. 11~13
- 2 刘松涛,程展林,任志伟. 高心墙土石坝非线性和弹性分析研究. 水利水电工程土石坝, 1999(2): 17

收稿日期:2002-08-30