

# 石板水水电站碾压混凝土坝设计

王秉钧

(国家电力公司成都勘测设计研究院, 成都, 610072)

**摘要** 石板水电站碾压混凝土坝技施设计中, 通过增设中孔、缩短溢流前缘、加宽横缝间距、采用距坝近的砂岩作碾压混凝土的粗骨料、采用二级配富胶凝材料碾压混凝土作防渗等, 简化了坝体结构并改善了坝体稳定及应力状况, 并通过温度控制和大坝安全监测, 为碾压混凝土坝全断面快速上升及安全运行创造了有利条件。

**关键词** 溢流前缘 横缝间距 整体及层面稳定 简易温度控制 二级配富胶凝材料碾压混凝土

## 1 工程概况

石板水电站位于长江上游南岸龙河干流, 地处重庆市涪陵区丰都县境内, 坝址和厂址距下游丰都县城 55.45 km, 距上游石柱县城 31~41 km, 坝址以上流域面积 1 640 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 58.4%。

石板水电站采用混合开发方式, 在原小龙河电站连拱坝下游建坝壅水。通过上游右岸隧洞引水至下游南江渡设厂发电, 大坝壅水高度约 80 m, 所形成的水库库容 1.05 亿 m<sup>3</sup>, 调节库容 0.77 亿 m<sup>3</sup>, 具有季调节性能。电站总装机容量 115 MW, 在电力系统中担负调峰、调频及事故负荷备用, 是地区电力规划中容量最大、又具有季调节性能的水电站。

石板水电站主要水工建筑物包括挡、泄水建筑物、右岸引水隧洞系统和发电厂区枢纽三大部分。坝址区出露岩层为砂岩、泥岩互层, 倾向上游 8°~12°; 河床中部的坝基为厚层长石石英砂岩, 坚硬完整, 岸坡中上部为砂质泥岩, 坝区无断层分布, 地质构造简单, 水库淹没较少, 建库建坝条件较好。挡泄水建筑物由左右岸挡水坝段、河床中部的溢流坝段、中孔坝段组成, 坝型为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 84.1 m; 引水隧洞系统由位于库区右岸的进水口、引水隧洞、调压井、压力钢管组成; 发电厂区枢纽由地面主厂房、副厂房、安装间、主变压器场、开关站等组成。

1992年8月, 在石板水电站的技施设计中, 对初设遗留的在挡泄水建筑物中设置中孔, 用于放空检修、排沙, 缩短溢流前缘与导流洞联合导流, 延长小龙河电站发电时间, 用砂岩作粗骨料等问题提出了研究报告。继后, 在施工过程中, 对左岸挡水坝段建基面的抬高、简化坝体结构等进行了优化设计, 减

少了基础岩石的开挖, 减少了混凝土方量。石板水电站主体工程挡、泄水建筑物土石方开挖量 20.47 万 m<sup>3</sup>, 混凝土总量 56.38 万 m<sup>3</sup>, 其中常态混凝土 23.45 万 m<sup>3</sup>, 碾压混凝土 32.93 万 m<sup>3</sup>, 碾压混凝土占总混凝土量的 58.4%。

1992年10月, 石板水电站进行了工程的施工招标, 同时开始了部分坝基的基础开挖, 1993年12月开始浇筑坝基基础层混凝土, 1996年9月电厂第1台机组发电。

## 2 碾压混凝土坝设计

石板水电站在初步设计阶段, 右岸为 6 个长约 18 m, 总长 115 m 的碾压混凝土挡水坝段, 河床中部为 5 孔, 每孔 20 m, 总长 100 m 的碾压混凝土溢流坝段, 每孔中间用闸墩分隔, 左岸为 13 个长约 18 m, 总长 234 m 的碾压混凝土挡水坝段, 左右岸挡水坝段坝基岩性为长石石英砂岩, 其下游坝坡为 1:0.75, 坝基基础岩性为砂质泥岩。其下游坝坡为 1:0.85, 上游坝面起坡点在 1/2 高度处向下分别为 1:0.25、1:0.35 坝段。坝体近上游设纵向基础灌浆廊道, 中部设基础排水廊道, 在溢流坝段下游还设有基础排水管, 坝体上部设检查廊道。坝体混凝土标号及分区采用金包银型式, 上游坝面常态混凝土防渗层最小厚度 2.5 m, 溢流坝及挡水坝下部厚度均为 3.0 m, 坝内廊道周围、基础垫层常态混凝土层厚 1~1.5 m, 混凝土标号 R<sub>90</sub>200S<sub>6</sub>, 坝顶及下游坝面常态混凝土厚 1.5 m, 混凝土标号 R<sub>90</sub>150S<sub>4</sub>。

在技施设计阶段, 为了充分发挥碾压混凝土筑坝技术的优势, 进一步优化坝体断面及结构布置, 增设了中孔及缩短溢流前缘, 取消了坝内上部纵向检

查廊道,加宽横缝间距,调整上下游坝坡及采用二级配富胶凝材料碾压混凝土防渗及坝体全断面碾压等。

### 2.1 增设中孔坝段及缩短溢流前缘

根据初设审查建议,在紧邻溢流坝段的右侧增设了一宽为12m的中孔坝段,加大了泄水能力,用于水库放空检修、排沙、泄洪、下游用水、施工导流等多种用途,并由此将溢流前缘缩短,仍维持5个溢流表孔,但每孔净宽改为12.0m,中墩厚4.0m,边墩厚3.6m,溢流坝段总宽度82.0m,分为2个坝段,坝段横缝设在5孔中间的溢流段上,每个坝段长41.0m。溢流坝段下游坡改为1:0.65,并将原设在坝内上层450.0m高程的纵向检查廊道取消。

溢流坝段的5个表面溢流孔为开敞式泄洪,每孔堰顶设一道12m×13.5m的平板检修闸门,一道12m×13.8m的弧形工作闸门,堰顶高程467m,坝顶高程482m,最大坝高84.1m,最大混凝土浇筑面积41.0m×57.0m。堰顶采用 $(x^2/3.6^2) + (2-y)^2/2^2 = 1$ 曲线方程的弧段与 $y = 0.0605x^{1.85}$ 的弧段和1:0.65的直线段连接,然后与 $R = 16.0m$ 、 $\theta = 77.2443^\circ$ 的反弧段连接。在下游420m高程处设挑流鼻坎,在闸墩桩号0+21.0~0+24.0m处设置宽尾墩,其收缩比 $\beta = 0.7$ ,折角 $\theta = 16.19^\circ$ ;并在边墩末端设置 $\alpha = 14^\circ$ 的折流墩以收缩水流,溢流坝下游为长40m,厚2.0m的混凝土护底,护底高程407.0m。

中孔坝段宽12m,包括压力进口段、明流段及挑流鼻坎。坝顶高程482.6m,最大坝高77m,中孔过流底板高程420.0m,断面尺寸为3.5m×7.2m,在最大洪水时与溢流坝表孔联合运行,宣泄500年一遇校核洪水 $Q = 6.630m^3/s$ 。

原设计中孔坝段弧形工作门及启闭控制系统位于进口检修闸门之后,孔洞占据了整个坝体上部,泄流孔以上坝体均为常态混凝土。为加快施工进度,增大坝体碾压混凝土区域,并使上部碾压混凝土与相邻坝段连成一片,将弧形工作门及控制系统移至坝后,简化了中孔坝段上部结构。简化后的中孔坝段,碾压混凝土量的比例由原来的18%增至40%,并方便了中孔孔洞以上坝体的碾压混凝土施工。

经修改后,在坝轴线处设一道3.5m×7.2m的平板检修闸门,在下游0+32.0m桩号中孔出口处设一道3.5m×6.0m的弧形工作闸门,尾部设挑流坎,尾部边墙呈弧形,中孔坝段下游坝面从474.0m至437.5m高程坡度为1:0.7,下游两侧边墙顶高程430.0m。

### 2.2 取消坝内上部廊道

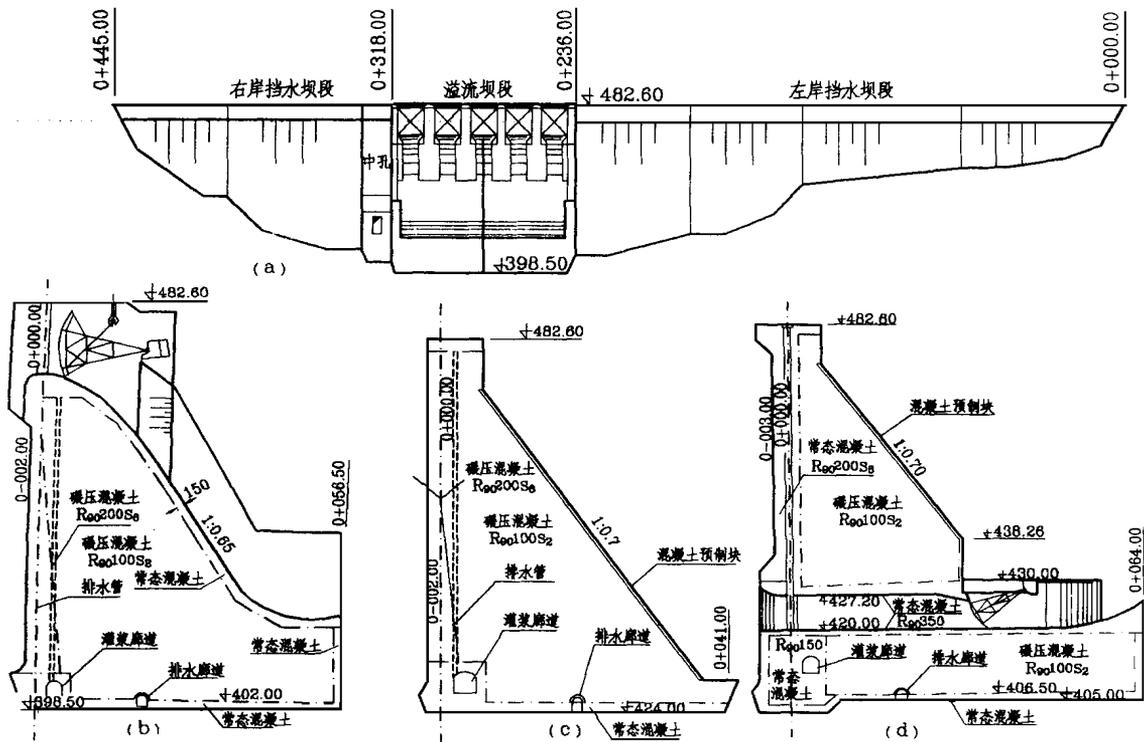
在技施设计中,考虑到碾压混凝土筑坝技术的特点,为方便施工,对坝体内部结构进一步优化,除了必须设置的基础灌浆廊道、排水廊道外,取消了坝体上部的检查廊道及溢流坝段下游基础排水管。混凝土防渗层后的坝体排水管在混凝土浇至溢流堰顶及坝顶后,用钻孔法形成,并用以监测坝体混凝土防渗层的工作状况。

### 2.3 加宽横缝间距

石板水大坝坝轴线较长,两岸坝头相距445m,初设时,坝体断面不设纵缝,沿坝轴线长度方向设常规宽度的横缝,约为18~20m。技施设计时,考虑到下列因素:两岸岸坡地形基本对称,坝基为坚硬完整的厚层水平状砂岩,坝段间沉陷变形相对较小等而决定采用碾压混凝土筑坝技术。碾压混凝土材料配合比中水泥用量少,粉煤灰掺量高,水化热最高温升产生的时间较常态混凝土迟后,绝热温升也低。龙河流域属亚热带湿润气候区,多年平均气温18.3~16.5,年温差变幅也小,由此而产生的温度应力及干缩变形相对也小。碾压混凝土采用机械化施工,适应大仓面薄层摊铺、碾压、连续上升,合理地安排混凝土浇筑时间,选择低温季节浇筑基础层及下部强约束区域混凝土,降低浇筑温度,加之两岸中上部泥岩与砂岩基础相邻,由于坝段横缝加宽后,其整体抗滑稳定安全系数较全部基础为泥岩基础坝段有较大的提高,同时参考与借鉴部分国内外碾压混凝土筑坝技术研究成果及成功经验,在技施设计中,设置了少量的、必要的沉陷缝、温度缝,除中孔坝段宽度为12.0m外,溢流坝段横缝间距加宽至41m,左右岸挡水坝段加宽至50m、60m、70m。石板水大坝结构布置见附图。

### 2.4 采用二级配富胶凝材料碾压混凝土防渗及坝体全断面碾压

为减少坝体断面混凝土种类及分区,减少常态混凝土区域,简化施工工艺,加快施工进度,坝体上游面采用二级配富胶凝材料碾压混凝土防渗。在层间喷水泥砂浆以增强其抗渗性能,与坝体内部三级配碾压混凝土层同时上升,二级配富胶凝材料碾压混凝土设计强度标号、抗渗标号分别为 $R_{90}200S_6$ 。防渗层的厚度按1/10水头差考虑,近基础部位不小于7.0m,坝顶正常蓄水位高程附近不小于2.0m,并在防渗层后设置坝体排水管,采用钻孔法形成,将通过坝面的渗水汇集流入基础廊道、集水井,由水泵抽排至下游。挡水坝段坝体下游面采用混凝土预制块,既作施工期模板又作为坝体的一部分。



挡泄水建筑物结构布置图

由于坝体断面构造及混凝土种类分区的简化,混凝土坝除基础层、溢流层面和闸墩等处为常态混凝土外,坝体大体积混凝土采用碾压混凝土,加之坝体下游面、廊道部位立模采用混凝土预制构件,这些都为大仓面碾压混凝土摊铺、碾压创造了有利条件,加快了大坝混凝土浇筑进度,全断面碾压混凝土坝较常态混凝土坝的坝体应力分布也较均匀。

### 3 整体与层间稳定分析和调整坝坡、抬高部分坝段建基面设计

石板水电站河床中部碾压混凝土重力坝坝基为厚层砂岩,岩石坚硬完整,力学强度高,  $f$ 、 $c$  分别为 1.0、1.2 MPa, 滑移面为混凝土与砂岩接触面, 下伏的砂质泥岩中有软弱夹层分布, 且具有一定的延展性, 在饱和情况下, 抗剪强度指标较低, 构成深层滑移控制面。两岸中上部挡水坝段基础为砂质泥岩,  $f$ 、 $c$  分别为 0.75、0.25 MPa, 其底部分布有一定延展性的软弱夹层, 构成了左、右岸砂质泥岩基础控制性滑移面。技施设计考虑了加宽横缝间距后, 各坝段整体抗滑稳定作用的加强, 上下游坝面下部开挖坡回填混凝土形成平台、坝后抗力体的作用等。同时, 调整了坝体断面的上下游坡, 取消了左右岸挡水坝段上游 1:0.3 的斜坡面, 改为垂直坝面, 下游坝坡统一调整为 1:0.7, 并部分抬高了左岸挡水坝段建

基面。经过各种工况下的坝体抗滑稳定复核核算, 均能满足安全要求。

碾压混凝土坝大仓面薄层摊铺碾压上升, 形成了较多的层面。一般情况下, 碾压混凝土层面的抗剪断强度参数较层内要低, 碾压混凝土重力坝需验算沿碾压混凝土层面的抗滑稳定, 对层面的抗剪断强度指标提出要求。通过核算, 石板水大坝碾压混凝土施工层面, 在坝体结构断面设置有排水管幕, 减少断面渗透压力情况下, 溢流坝及挡水坝段下部等处的碾压混凝土层间抗剪断强度指标应达到  $f = 1.0$ 、 $c = 1.0$  MPa, 即不小于建基面混凝土与新鲜微风化的砂岩接触面的抗剪断强度指标。大坝建成后, 经对坝体碾压混凝土钻孔取芯试验, 其最小值均能满足上述抗剪断强度指标的要求。

### 4 碾压混凝土设计

初设时, 碾压混凝土原材料使用涪陵新建水泥厂生产的普通硅酸盐 425 号水泥和重庆电厂粉煤灰, 由于本区缺乏拌制混凝土的天然砂石骨料, 原方案的砂石骨料均采用距坝址约 17 km 的茶园灰岩砂石料场。技施阶段, 水泥改用茶园水泥厂生产的普通硅酸盐 425 号中热水泥。经过对几个砂岩料场的详细调查和对骨料、混凝土试验, 认为砂岩作拌制混凝土的粗骨料是完全能满足规范要求的。因此, 决定拌制混凝土的粗骨料改为距坝址最近的左坝头砂岩

料场,石板水电站碾压混凝土水泥、粉煤灰、粗细骨料、碾压混凝土配合比试验检测成果及碾压混凝土设计标号、物理力学指标见表1~表6。碾压混凝土配合比中,三级配人工碎石80~40mm、40~20

mm、20~5mm的比例为30:40:30;二级配人工碎石40~20mm、20~5mm的比例为60:40,灰岩人工砂细度模数控制在2.8~3.0,粒径小于0.15mm的石粉含量控制在15%~18%,外加剂使用

表1 水泥物理力学性能检测成果表

水泥品种	比重	凝结时间(h·min)		抗压强度/抗折强度/MPa			细度/%	安定性
		初凝	终凝	3d	7d	28d		
茶园中热425号	3.12	3:00	4:50	16.2/4.4	24.7/5.6	42.7/7.3	9.5	合格

表2 粉煤灰品质检测成果表

项目	比重	细度/%	烧失量/%	需水量比/%	SO <sub>3</sub> 含量/%	70℃蒸养强度比/%
重庆粉煤灰	2.38	20	6.4	95	1.11	162
国标II级灰		20	8	105	3	

表3 粗骨料物理力学性能检测成果表

岩石种类	饱和面干比重	饱和面干吸水率/%	最佳振实容重/kN·m <sup>-3</sup>	针片状含量/%	压碎指标值/%	软化系数	干抗压强度/MPa	湿抗压强度/MPa
砂岩	2.53	3.2	16.3	11.8	20.4	0.916	82.9	75.9

表4 人工砂试验成果表

岩石种类	棒磨机加棒量/kg	制砂成品率/%	细度模数	含粉量/%	松散孔隙率/%	松散容重/kN·m <sup>-3</sup>	饱和面干比重	饱和面干吸水率/%
灰岩	51	86.7	2.91	17.2	41	15.7	2.71	1.00

表5 碾压混凝土配合比表

设计标号/MPa	级配	水胶比	砂率/%	粉煤灰掺量/%	每m <sup>3</sup> 混凝土材料用量/kg·m <sup>-3</sup>					V <sub>c</sub> 值/s	备注	
					水	水泥	粉煤灰	砂	石			木钙
R <sub>90</sub> 10	3	0.63	35	60	95	60	90	798	1401	0.375	8~12	砂岩人工碎石
			35	52	98	75	80	795	1395	0.388		
			34	63	95	55	95	775	1416	0.375		
R <sub>90</sub> 20	2	0.60	40	30	110	126	54	890	1261	0.450	8~12	灰岩人工砂

表6 碾压混凝土物理力学指标表

设计标号/MPa	容重/kN·m <sup>-3</sup>	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉伸×10 <sup>-4</sup>	抗渗	抗剪断		
							f	c	MPa
R <sub>90</sub> 10	24.0	>10	>0.8	17.5	>0.65	S <sub>2</sub>	1.0		1.1
R <sub>90</sub> 20	24.0	>20	>1.5	25.0	>0.85	S <sub>6</sub>	>1.0		>1.1

RC-1 高效减水剂。

## 5 温度控制

工程所在地地处亚热带湿润气候区,具有“春雨、伏旱、秋雨绵绵、冬干”的特点,多年平均气温18.3~16.5,平均年降雨量953.5~1394.1mm之间,降雨日数144.6~156d,主要集中在4~9月,相对湿度79%~78%,年蒸发量1240.9mm,一年之中,6~8月气温较高,达25~29。大坝碾压混凝土为了降低热强比,在使用的原材料及配合比中,采用了茶园水泥厂生产的普通硅酸盐425号中热水泥,砂岩人工碎石、灰岩人工砂,采用低水泥用量高掺粉煤灰,水泥、粉煤灰的用量分别为60kg/m<sup>3</sup>和90kg/m<sup>3</sup>,胶凝材料中,粉煤灰掺量达60%,掺高效减水剂RC-1及采用低水胶比等。

在碾压混凝土重力坝基础块温升及温度应力计算中,所采用的碾压混凝土热学指标见表7。溢流坝段基础浇筑块开始浇筑的时间、浇筑温度、浇筑速度以及温度和温度应力计算结果见表8。

表7 碾压混凝土热学指标表

设计标号	比热c/kJ·(kg·K) <sup>-1</sup>	导热系数λ/W·(m·K) <sup>-1</sup>	导热系数λ/W·(m·K) <sup>-1</sup>	绝热温升T <sub>0</sub> /°C	线膨胀系数α/1·K <sup>-1</sup>	密度ρ/kg·m <sup>-3</sup>
碾压混凝土R <sub>90</sub> 100	0.850	0.094	2.00	16.58	7.5×10 <sup>-6</sup>	2450

表8 溢流坝基础块混凝土温度及温度应力表

开始浇筑时间	浇筑温度T <sub>j</sub> /°C	浇筑速度U/m·d <sup>-1</sup>	最高温度T <sub>m max</sub> /°C	基础温差ΔT/°C		最大温度应力σ <sub>m max</sub> /MPa
				(0~0.2)L	(0.2~0.4)L	
10~4月	当月平均气温	1.0	31.02	14.02	12.42	0.567

(下转第43页)

1996年9月30日提前两个半月投产发电。其余3台机组也相继于1997年2月24日、1997年12月8日、1998年1月8日上网运行。创造了良好的经济效益和社会效益。

### 3 工程质量控制

工程质量直接影响施工进度,影响工程应有效益的发挥,隐含于工程造价之中。质量与造价的关系相当复杂,质量优良、施工进度减慢,造价高,但后期效益相当可观。质量低劣,施工进度加快,造价低,但后期处理必然影响工程进度,并发生额外费用,从而直接增大工程造价,且潜伏着危机,影响后期效益的正常发挥,一旦发生安全事故,其损失将不可估量。因此,公司在质量管理过程中坚持“确保合格,力创优良”以及“以质量为中心,以进度为龙头”的指导思想,将质量与进度、工程造价统一起来。

(上接第22页)

利用低温有利季节开始浇筑混凝土,尤其是基础约束区混凝土,以降低最高温度,减少最高温度和稳定温度的差值,从而减小坝体产生的温度应力。根据月平均气温情况,按照预定的施工安排,除每年的6~8月气温较高,需采取简易降低混凝土浇筑措施外,每年的10月至第2年的4月平均气温均较低,混凝土可直接入仓摊铺碾压。降低浇筑温度的简易温控措施有:搭凉棚、在骨料堆上洒水喷雾、骨料堆高、地垅取料等,混凝土浇筑应尽量避免日间高温,利用午后及夜间凉爽时段摊铺、碾压及对已浇混凝土面喷水雾降温养护。在施工中应尽量避免混凝土、碾压混凝土骨料分离,提高其抗裂性能,混凝土强度的保证率和匀质性指标应满足表9要求。碾压混凝土施工采取薄层摊铺碾压均

表9 强度保证率和匀质性指标表

混凝土种类	强度保证率 离差系数	
	P/%	C <sub>v</sub>
基础层常态混凝土	85	0.15
碾压混凝土	80	0.20

匀连续上升方式,应尽量避免在基础约束范围内的长间歇和在老混凝土上浇筑薄层混凝土后长间歇,加强对已浇混凝土表面的洒水养护,在低温季节以

在质量管理方面,公司建立并完善了质量保证体系,颁发了一系列管理制度和条例,着重加强现场监督、实验检测,并采取有力措施,坚决果断地处理质量缺陷等诸方面事故,实施全过程质量监控。

按水利水电工程质量等级评定标准和规程,经施工单位自评、建设单位复评、省检测中心站终评,石板水电站已完成单元工程2583个,全部合格,优良率68.2%。符合工程质量要求。

目前,石板水电站工程建设已接近尾声,即将组织竣工验收。预计工程竣工结算不超过65000万元(含小机和副坝),大大低于修正概算,达到了控制工程造价的目的,创造最佳经济效益。实践证明,只有将“遵守合同、力促进度与确保质量”三者紧密结合起来,才能真正做到有利于控制工程造价。

作者简介

陈凌男 重庆涪陵水资源开发有限责任公司石板水电厂 助理工程师

(收稿日期:1998-12-28)

及气温骤降期间应延缓拆模时间,并预先做好表面保温防护,对坝内廊道孔洞进行遮闭等。

### 6 大坝安全监测

为了掌握大坝在施工和运行期间的工作特性,需监测大坝的安全运行。结合坝体结构布置和碾压混凝土筑坝的特点,布置埋设了少量必要的观测仪器设备,对石板水大坝的水平垂直变形、坝体温度、坝基扬压力、渗流量、水温、水位等进行了监测。

水平和垂直变形通过在坝顶的引张线观测系统,坝顶及廊道中埋设沉陷标点水准观测进行,碾压混凝土坝体温度监测选择具有代表性的溢流坝段断面,从坝体下部基础到坝顶沿高程分4层布置,从上游至下游坝面共埋设了24支DW-1型温度计,形成平面温度场,对施工及运行期间坝体温度变化状况进行监测。在溢流、挡水坝段坝基处还布置了测压管、渗压计,对坝基扬压力进行监测,在基础灌浆廊道中设置了量水堰对各坝段的渗漏流量进行监测。

作者简介

王秉钧男 国家电力公司成都勘测设计研究院水工一处 教授级高级工程师

(收稿日期:1998-09-03)