

天门河水库面板堆石坝体形 优化及面板治理设计

张全意, 申洪波

(遵义水利水电勘测设计研究院, 贵州 遵义 563002)

摘要: 天门河水库混凝土面板堆石坝设计中, 结合筑坝材料质量, 优化了体形及面板结构, 节省了工程投资且有利于施工。但由于工程建设中停工, 造成部分面板底部发生变形破坏和垫层料脱空等问题, 经对破坏原因进行分析, 提出了切实可行的新浇面板和趾板及垫层料脱空治理设计, 取得了较好的效果。

关键词: 面板堆石坝; 优化设计; 面板裂缝; 垫层料脱空; 治理设计; 天门河水库工程

Shape Optimization and Face Treatment Design of Tianmenhe Face Rockfill Dam

Zhang Quanyi, Shen Hongbo

(Zunyi Institute of Water Resources and Hydropower Survey and Design, Zunyi Guizhou 563002)

Abstract: In the design of Tianmenhe concrete face rockfill dam, the shape and face structure of dam was optimized after taking into account the quality of damming material. The optimization saves project investment and conducive to the construction of dam. As discontinuous construction of dam, there are deformation in the bottom of and bedding void under parts of concrete face. The treatment measurements for concrete face deformation and bedding void are proposed and the placement of face and plinth are redesigned.

Key Words: face rockfill dam; optimal design; face crack; bedding void; treatment design; Tianmenhe Reservoir Project

中图分类号: TV641.43 (273)

文献标识码: B

文章编号: 0559-9342(2010)08-0000-00

1 工程概况

天门河水库为中型水库, 位于贵州省桐梓县, 具有防洪、灌溉等多种功能。水库总库容 2 360 万 m³, 防洪高水位 1 001.90 m, 正常蓄水位 991.00 m, 死水位 984.00 m。水库主要枢纽建筑物有拦河坝、左岸溢洪道、右岸放水及放空兼冲沙隧洞等。

工程于 2000 年 6 月开工, 2002 年 10 月 1 日大坝填筑到 1 000.00 m 高程 (防浪墙底部), 上游坝坡垫层料喷 M10 水泥砂浆保护。2003 年 4 月开始混凝土面板浇筑, 至 2003 年 6 月, 共完成 B₁、B₃~B₁₀ 9 块面板施工, 2003 年底工程停工, 大部分面板止水结构和坝脚面板盖重保护未按要求完成。2007 年元月工程复工, 2008 年 11 月通过水库蓄水安全鉴定, 2009 年 3 月下闸蓄水。

2 大坝设计

根据坝址处地形地质条件, 经不同坝型枢纽布

置方案技术经济比选后, 确定拦河坝采用混凝土面板堆石坝。初步设计阶段最大坝高 49.5 m, 坝顶宽 6.0 m, 上、下游坝坡为 1:1.4, 最大坝底宽 136.72 m, 上游防渗面板厚 0.3~0.5 m, 面板分缝岸坡段为 6 m, 河床段为 12 m, 趾板厚 0.5 m, 置于弱风化岩基上, 河床段趾板建基面高程为 954.50 m。

施工阶段根据趾板二次定线的布置, 河床段趾板基础开挖至 958.50 m 高程后发现岩体较完整, 其饱和抗压强度大于 30 MPa, 波速大于 3 000 m/s, 考虑坝高对基础条件的要求, 将河床段趾板基础建基面高程提升为 958.50 m, 并结合筑坝材料质量, 对大坝体形结构进行了优化设计。

2.1 结构布置

优化后, 面板堆石坝坝顶高程 1 004.00 m, 最

收稿日期: 2010-07-06

作者简介: 张全意 (1968—), 男 (仡佬族), 贵州道真人, 高级工程师, 副总工程师, 从事水工建筑物设计和技术管理工作。

大坝高 45.5 m，坝顶长 195 m，宽 5.5 m，上、下游坝坡坡比为 1:1.3，下游坝坡在 980.00 m 高程设 1.5 m 宽的马道，最大坝底宽 116.6 m。上游钢筋混凝土防渗面板采用 0.35 m 等厚面板，其上游面下部设防渗铺盖，顶高程为 965.00 m。面板后分别设垫层、过渡层、主堆石区、下游次堆石区。下游坝面为干砌块石护面。趾板厚 0.5 m，宽 4~5 m。大坝剖面见图 1。

坝顶上游侧设“L”形防浪墙，墙顶高程 1 005.20 m，底高程 1 000.00 m，坝顶以下高 4.0 m。在防浪墙上游直墙底部 1 000.50 m 高程设 0.7 m 宽检查便道，下游侧设 2.25 m 高的挡墙，墙顶高程与坝顶齐平。防浪墙与面板之间设水平缝连接，按周边缝要求设计。防浪墙沿坝轴线设永久缝，与面板分缝布置对应，缝内止水与面板间水平缝止水连成一体。

2.2 坝体分区和材料设计

坝体分区以控制坝体变形为主导，尽量避免面板裂缝的产生和接缝止水的破坏，同时要有良好的级配过渡，满足设计透水要求。筑坝材料为栖霞组中厚层灰岩。

根据室内试验参数，结合现场碾压试验成果，并类比国内同类工程，确定坝体各分区填筑料的级配及设计控制参数。坝体共分 8 个区，即垫层区 (2A)、特殊垫层区 (2B)、过渡区 (3A)、主堆石区 (3B)、下游次堆石区 (3C)、坝前盖重保护区 (1A)、坝前辅助防渗区 (1B) 和下游坝面干砌石。

坝体主要分区材料设计参数及压实标准见表 1。

2.3 趾板及面板设计

趾板基础置于弱风化基岩上，采用 0.5 m 等厚混凝土板式结构，其中左岸坡 988.0~1 000.00 m 高程段，由于布置有溢洪道进口导水墙，趾板按趾墙设计。趾板表面采用单层双向钢筋，单向配筋率约为 0.4%，设置锚筋与基岩锚固。

结合趾板二次定线的布置，面板仅设等宽垂直缝，间距 15 m。采用单层双向配筋，单向配筋率 0.36%，周边缝两侧设置抗挤压的构造钢筋。

趾板和面板混凝土设计强度为 C25，防渗 W8，抗冻 F50。

2.4 分缝和止水

(1) 面板垂直缝。面板混凝土采用滑模浇筑，面板内不设永久水平缝，为适应坝体变形，面板设置 12 条垂直伸缩缝，其中，中部的 7 条为压性缝，两岸的 5 条为张性缝。压性缝和张性缝底部各设一道“W”型铜止水，缝面涂刷沥青乳液；张性缝顶部采用 GB 弧凸状塑性填料，外加三元乙丙复合板并用不锈钢扁钢固定封闭保护。

(2) 周边缝。周边缝缝宽 12 mm，缝内设 12 mm 厚沥青浸渍杉木板，底部止水采用“F”型紫铜止水片，预埋在趾板混凝土内，垫层料填筑后，在铜止水片下部挖槽回填沥青砂，上敷 PVC 止水片，再将铜止水片与塑料止水片粘结牢固。止水铜片中

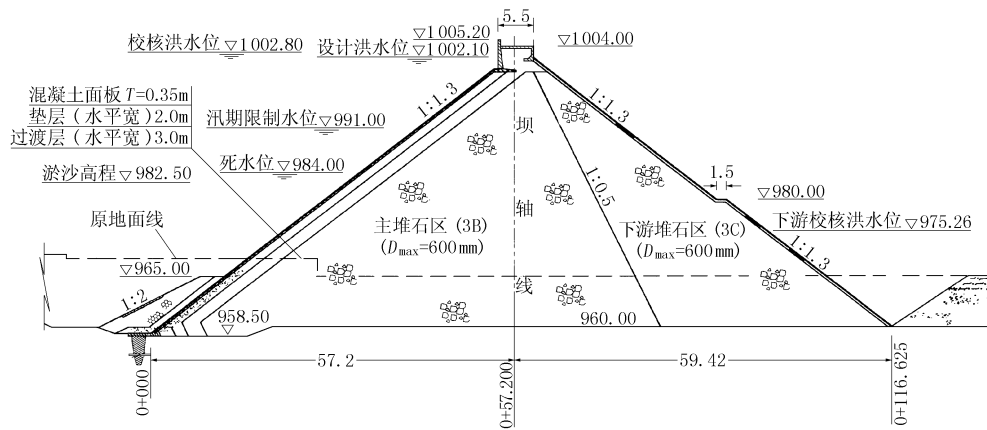


图 1 大坝剖面示意 (尺寸单位: m)

表 1 坝体主要分区材料设计参数及压实标准

坝体分区	铺层厚度/m	最大粒径/mm	碾压机械	碾压遍数	洒水量 (体积比) /%	干密度/t·m ⁻³	孔隙率/%	备注
垫层区 (2A)	0.4	80	13.5 t 斜坡碾	6	适量	2.2	15	渗透系数 1×10 ⁻³ ~10 ⁻⁴
过渡区 (3A)	0.4	300	18 t 振动碾	6	15~20	2.15	20	渗透系数>1×10 ⁻³
主堆石区 (3B)	0.8	600	18 t 振动碾	8	15~20	2.1	22	渗透系数>1×10 ⁻³
下游次堆石区 (3C)	0.8	600	18 t 振动碾	6	15~20	2.05	25	渗透系数>1×10 ⁻³
特殊垫层区 (2B)	0.2	40	手扶振动碾	6	适量	2.2		掺适量粉煤灰

间凹槽内嵌设 $\phi 12$ mm 的实心 PVC 棒；顶部“V”形槽内设 $\phi 25$ mm 的 PVC 棒，缝顶部采用 GB 弧凸状塑性填料，外加三元乙丙复合板并用不锈钢扁钢固定封闭保护。

(3) 防浪墙与面板顶部水平接缝。该水平缝的接缝止水结构与周边缝相同。防浪墙伸缩缝分缝位置与面板垂直缝相对应，中部设置一道铜止水。

2.5 基础处理

(1) 边坡。坝址为岩层倾向下游的斜向谷，岸坡基岩大多裸露，两岸开挖边坡高度均在 15 m 以内，开挖后边坡岩体较完整、稳定，因此只对左岸局部边坡倒悬岩体设置砌体支撑，对右岸趾板线中部以上的瘤状泥灰岩段采用挂网喷混凝土支护。

(2) 趾板基础。在施工开挖过程中，根据开挖后的地形、地质条件，对趾板进行二次定线，对两岸超挖部分采用 C15 混凝土回填作为趾板基础。由于趾板沿线裂隙较发育，局部有软弱夹层存在，为提高基础岩体的均一性、抗渗性以及强度，避免基础变形和不均匀沉陷，对趾板基础沿线作固结灌浆和锚筋加固处理。固结灌浆孔采用梅花形布设，共 3 排。以趾板中心线为基线设 1 排（该排固结孔与帷幕孔相同，既是固结孔又是帷幕孔），上、下游各设 1 排，排距 1.5 m，上下游排孔距均为 1.5 m。

(3) 防渗帷幕灌浆。根据坝区两岸及沿趾板线的钻孔资料，两岸坡地下水埋藏较深（左岸坡 968~990 m，右岸坡 968~992 m），在一定深度范围内岩石的透水性较强，故坝基需作防渗处理，防渗标准采用 $q \leq 3$ Lu。坝基防渗帷幕线沿趾板中心线布置，左岸从溢洪道 1 004 m 高程的马道内侧起，经溢流堰前齿槽中心线接趾板帷幕，延伸至左岸公路；右岸接趾板帷幕沿坝轴线延伸至放水隧洞。帷幕总长 336 m，孔距 3 m，共计布孔 113 个。

2.6 观测设计

结合国内相似规模混凝土面板堆石坝安全监测工作的经验和天门河水库混凝土面板堆石坝的实际情况，设置了变形、渗流、应力应变等监测项目。

(1) 大坝外部变形。于坝顶防浪墙、下游坝坡及溢洪道右侧导水墙上设置 12 个表面变形观测标点，分别对坝体的水平和垂直位移进行监测。

(2) 坝体内部变形。选择大坝河床最高断面，分两个高程埋设水平位移计和水管式沉降仪，共布置 6 个垂直位移监测点和 2 个水平位移监测点。

(3) 面板及接缝变形。为了监测面板及止水结构变形情况，在面板周边缝共布设有 10 组三向测缝计，在面板垂直缝布设 8 组单向测缝计。

(4) 渗流。由于坝脚为小西湖库尾，常年水位

970.10 m，高于坝基 10 m 以上，在坝脚设置量水堰的难度较大，加之该工程的主要功能为防洪，因此采用沿河床部位最高横断面顺水流方向布设 4 支渗压计进行渗流监测，并结合坝基地质条件，在左、右两岸布设绕坝渗流监测孔。

3 大坝面板裂缝及垫层料脱空治理

由于工程建设中停工近 3 年，恢复施工后发现，已浇的 B₄~B₁₀ 混凝土面板在 963.50 m 高程上下约 1 m 范围内有平行于坝轴线的横向裂缝，且 B₅~B₉ 面板与河床周边缝发生变形。中部的 B₆~B₈ 3 块面板变形较大，向上游产生最大外凸 32 cm (B₇) 的位移，周边缝止水铜片大部分破坏。根据在每块面板裂缝处打孔检查，面板下部垫层料脱空量为 3~28 cm，其中 B₆、B₇、B₈ 面板周边缝破坏严重，垫层料最大脱空量达 40 cm。经检查，河床及岸坡已浇趾板未发现裂缝和变形。大坝面板裂缝分布示意图 2。

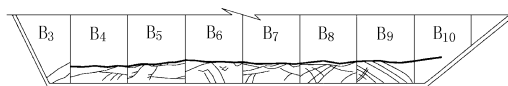


图 2 大坝面板裂缝分布示意

3.1 破坏原因分析

分析认为，大坝建基面均坐落在基岩上，且趾板及其下游 15 m 范围基础为弱风化基岩，河床段及岸坡中下部趾板已完成固结和帷幕灌浆，坝体填筑材料的结构分区、级配、密度、孔隙等设计参数满足规范要求，坝体填筑质量控制严格，各项施工参数满足设计和规范要求，因此面板裂缝及垫层料脱空不是大坝设计和施工的问题。同时根据大坝施工期和停工时段观测数据，坝体沉降变形符合面板堆石坝变形的一般规律，2002 年 4 月~2007 年 1 月沉降观测数据表明，最大累计沉降量为 92 mm，大部分测点大坝内部沉降趋于稳定，少部分测点沉降量虽有增加，但沉降速率已明显减小。坝体内部水平位移测值稳定，施工期坝体水平位移最大值为 13.51 mm，不至于使上游面板发生较大的变形破坏。加之大坝在河床段底部约 963.50 m 高程有 7 块面板 (B₄~B₁₀) 产生了一条基本平行于坝轴线的水平贯通性裂缝，因此认为，面板应是在下部受到均匀反向力作用后产生折断。

经现场检查分析，大坝上、下游土石围堰均位于砂砾石层上（厚 3~5 m），上游围堰采用粘土铺盖和灌浆相结合的防渗措施，其铺盖的顶部高程为 976.20 m，而下游围堰大部分是用坝基开挖料填筑，未作防渗处理，堰体及基础渗水严重。由于大坝下

游坝脚为小西湖库尾,其常年库水位高于河床段趾板建基面高程 11.5 m,小西湖库水通过下游围堰反渗至坝基,使大坝上、下游基坑存在较大的水位差,在坝体内部形成较大的反向渗水压力,造成上游处于临空状态的面板产生折断,而且周边缝止水结构破坏,也带走了部分垫层料。

3.2 治理措施及效果

针对已浇面板产生的裂缝、变形和脱空情况,从技术方案可行、投资省、易施工等方面进行综合比较后,决定采用新浇趾板和面板的治理措施。

3.2.1 新浇面板和趾板处理

根据面板裂缝的分布和变形破坏情况,在河床段已浇趾板上再浇趾板以支撑新浇面板。新浇混凝土趾板和面板的起始高程分别为 959.00~959.40 m 和 959.80~965.00 m,长 90 m (B₄~B₉块面板),厚度分别为 0.4、0.3 m,为 C25 钢筋混凝土,各布置单层双向 $\phi 25$ mm@200 mm 钢筋。为防止面板再次承受反向渗压,在每块面板底部沿已浇趾板的顶部埋设 1 根 $\phi 200$ mm 排水管。

新浇趾板与面板的周边缝及面板之间的垂直缝设两道止水,其底部分别设“F”和“W”型止水铜片,顶部设柔性填料,周边缝缝间设沥青木板,缝面涂刷沥青乳液, B₃~B₁₀ 面板在 965.00 m 高程处新老面板接触缝表面增设柔性填料。对新老面板周边缝和垂直缝的止水铜片采用人工凿槽焊接,形成封闭的防渗体系。

3.2.2 垫层料脱空处理

针对坝体垫层料脱空现状,结合已建同类工程的处理措施,对垫层料脱空部位采用水泥粉煤灰混合料灌浆充填密实,配合比(水泥:粉煤灰)为 1:4.3,水胶比为 0.5~0.8,面板灌浆孔采用梅花形布置,孔距 3 m,排距 1.5 m。

充填灌浆采用自下而上重复灌浆施工方式,灌浆压力为 0.05~0.25 MPa (实际施工最大压力 0.3 MPa),当灌浆材料凝固收缩后再重复施灌,并依据各块面板灌浆充填后的检查数据,调整灌浆材料的水胶比和灌浆压力;灌浆过程中安设抬动仪,严禁施灌过程中引起面板新的破坏。

3.2.3 面板治理后的应力及变形

按治理后面板、趾板的结构尺寸,采用三维非

线性有限元分析计算,计算结果显示,面板轴向位移和应力分布规律基本正常,顺坡向应力分布因面板底部加厚而有所变化,由于面板刚度突变,在 965.00 m 高程以上面板内出现了一定的顺坡向拉应力,但拉应力较小,最大值仅为 -0.51 MPa。总体而言,面板的应力及变形都不大,高水位下面板最大挠度为 5.7 cm,最大轴向位移 0.37 cm,在正常范围内,新老面板结合处没有出现明显的变形;水库不同运行工况下,面板最大压应力小于 5 MPa,最大拉应力小于 1.05 MPa,面板垂直缝和周边缝的最大变形值分别为 0.9、5.3 mm。

从上述计算成果分析,水库蓄水后,大坝面板产生的拉、压应力值均在面板混凝土的允许范围内,虽新老面板结合处出现了一定的拉应力,但其值较小,不会对面板造成破坏;面板垂直缝和周边缝的变形较小,在止水结构允许范围内。

4 结 语

天门河水库工程混凝土面板堆石坝设计结合筑坝材料质量和开挖后的地质条件,优化了体形及面板结构,提高趾板建基面高程,节省了工程投资且有利于施工。但是,由于工程建设中停工近 3 年,造成部分面板开裂变形和垫层料脱空,这在国内同类工程中属少见。针对出现的问题,及时收集相关资料,分析破坏原因,提出了切实可行的治理设计。

水库蓄水后的大坝监测资料表明,坝体位移、沉降、坝基渗压及面板垂直缝、周边缝测值变化量较小,未见异常。

参考文献:

- [1] SL228—98 混凝土面板堆石坝设计规范[S].
- [2] 蒋国澄,傅志安,凤家骥主编.混凝土面板坝工程[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997.
- [3] 贵州省大坝安全监测中心.桐梓县天门河水库工程施工期观测简报[R].2007.
- [4] 遵义水利水电勘测设计研究院.桐梓县天门河水库工程大坝有关问题处理方案[R].2007.
- [5] 南京水利科学研究所.桐梓县天门河水库工程面板治理三维有限元分析报告[R].2007.
- [6] 南京水利科学研究所.贵州省桐梓天门河水库蓄水安全鉴定报告[R].2008.

(责任编辑 常青)