

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.03.028

软基岩层上的混凝土重力坝设计及基础处理

薛晓鹏, 王维维, 郑柯君

(咸阳市水利水电规划勘测设计研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 坝体结构稳定和坝基防渗是决定工程安全和预期效益的关键因素。柏岭寺水库水利枢纽工程设计方案, 大坝采用碾压混凝土重力坝, 大坝基础开挖后, 坝基持力层由砾岩变为砂岩。现有的混凝土重力坝大多数建在硬岩, 软基上建坝的较少, 通过调整坝体边坡, 改变局部尺寸和坝基灌浆方案的措施, 解决了软弱基岩上坝体稳定, 坝基渗漏等问题, 可为类似工程设计方案的选定提供一定的参考价值。

关键词: 软基岩层; 混凝土重力坝; 设计; 基础处理

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)03-0140-05

The Design and Foundation Treatment of Concrete Gravity Dams on Rock Foundations with Weak Layers

XUE Xiao-peng, WANG Wei-wei, ZHENG Ke-jun

(Xianyang Planning, Investigation, Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: The stability of dam structure and the seepage prevention of the dam foundation are the key factors that affect the safety of the construction and the achievement of the expected benefit. The design scheme of a hydro-junction project, Bailingsi reservoir was introduced in this paper. Its dam is roller-compacted gravity dam. After the excavation of the dam foundation, the supporting layer of the foundation transferred from the conglomerate layer to the sandstone layer. However, existing concrete gravity dams were mostly built on hard rocks, rarely on soft rocks. Through the adjustment of the slope, partial specification and the grouting measures of the dam foundation, the stability and seepage problems of the Bailingsi reservoir dam which was built on the soft rock foundation were solved. This study can provide some references for the design of similar engineering projects.

Keywords: weak layers; concrete gravity dam; design; foundation treatment

水利枢纽工程中, 混凝土重力坝作为一个悬臂结构承受水的巨大推力, 靠各截面的抗剪强度维持稳定。坝基一般选在岩体岩性均一、岩质坚硬的弱风化岩上, 用现代理论设计和施工工艺浇筑的混凝土重力坝, 只要坝基岩体比较完整, 没有明显缺陷, 发生整体失稳的可能性是非常小的^[1]。然而随着经济发展的需要, 坝址的选择不仅仅局限在基岩条件好的地址上, 基岩条件复杂、具有软弱夹层的筑坝项目逐渐增多^[2]。过去, 对坝基重要性问题认识不足, 因而对地质勘测和工程处理方面工作做得不够, 造成重大损失, 美国圣弗兰西斯坝和法国布泽坝的失事均是由软弱坝基引起的^[1]。坝基防渗工程同等重

要, 其成败决定着工程是否能发挥预期效益^[3]。一方面取决于防渗工程设计是否合理, 另一方面取决于施工质量^[4-6]。按照设计规范规定^[7], 防渗工程的设计应该满足下面相关要求: 控制坝基面渗透压力和渗流量; 控制坝基软弱夹层、断裂破碎带、岩体裂隙充填物以及抗水能力差的岩层不出现管涌; 控制渗漏对两岸边坡稳定以及坝基的不利影响; 保证足够的耐久性和可靠的连续性。

本文以柏岭寺水库工程为例, 介绍了通过采用调整坝体边坡、改变局部尺寸以及坝基灌浆处理的方式使软弱地基筑坝工程满足安全需要。以期为类似工程设计方案的选定提供参考价值。

1 工程概况

柏岭寺水库工程位于咸阳市旬邑县境内泾河一级支流三水河中游,主要任务是城乡生活和工业供水。水库正常蓄水位 1 066.3 m,死水位 1 057.0 m,设计洪水位 1 066.3 m,校核洪水位 1 066.4 m;水库总库容 990 万 m^3 ,其中兴利调节库容 600 万 m^3 。多年平均供水量 1 465 万 m^3 ,供水保证率达到 97.9% (按月计算)。水库枢纽主要由大坝及泄洪排沙设施和放水建筑物组成,采用在左岸河床段设主坝、右岸一级阶地设副坝以及主坝段坝身设表孔、底孔泄洪和管道放水的总体布置方案。主坝为碾压混凝土重力坝,坝顶全长 152 m,其中中部溢流坝段长 77 m,左、右两端非溢流坝段分别长 50 m 和 25 m,坝顶宽 6 m,最大坝高 38.5 m,坝顶高程 1 068 m。溢流坝段堰顶高程 1 059 m。副坝为土坝,坝顶长 108 m,坝顶宽 6 m,坝顶高程 1 068 m,下游坡比 1:2,上游为阶地回填整理形成平台,水库正常蓄水位以上坡比 1:2,以下坡比 1:3.5,沿坝轴线设混凝土防渗墙。

2 工程地质条件

柏岭寺水库主体工程开工建设,大坝基坑采用爆破施工,揭露大坝坝基地层为砾岩(K12)(硬岩),基坑持力层岩性为基本水平稍向西(右岸)倾斜的砾岩夹砂砾岩,同时根据现场风钻孔确定该层厚度从 1.8 m 到 0.6 m 不等,其下卧层为深厚砂岩(K12)(软岩),现场情况与原初步设计地质资料提供的坝基持力层为 8m 厚水平砾岩(硬岩)相比在出露高程与厚度方面均发生变化。根据地质补充勘察,坝基红砂岩透水率等物理力学指标与初步设计阶段变化较大。其砾岩物理力学指标: $f' = 0.8$, $c' = 0.7$,变形模量 $E_{\delta 0} = 6.0 \text{ GPa}$;砂岩物理力学指标: $f' = 0.5$, $c' = 0.3$,变形模量 $E_{\delta 0} = 1.0 \text{ GPa}$ 。

由于大坝持力层变为第④层红砂岩,砂岩岩体承载力较砾岩有所降低,且由于施工开挖后岩体卸荷作用下对坝基岩体向上抬动,岩体中存在透水夹层,根据施工地质补勘压水试验^[8]成果,在勘探深度内,岩体透水率 4.7 Lu ~ 91.57 Lu,平均为 22.72 Lu,属中等透水性。

3 挡水建筑物设计

初步设计与变更设计坝型均为碾压混凝土重力坝为主坝,土坝为副坝。水库规模没有发生变化,故水库调节分析计算和调洪演算所确定的水库正常蓄

水位为 1 066.3 m,设计洪水位为 1 066.3 m,校核洪水位为 1 066.4 m 不变,坝顶高程亦为 1 068.0 m。挡水大坝主坝为混凝土重力坝,副坝为土坝体,坝顶总长 260 m,其中溢流坝段高 28.5 m,长 77 m,非溢流段最大坝高 38.5 m,坝顶长度 183 m。

3.1 初步设计

原混凝土挡水坝体设计,坝顶宽 6 m,大坝非溢流面上游 1 045 m 高程以上坡铅直,1 045 m 高程以下坡比 1:0.1,下游坡比为 1:0.75。溢流面采用 WES 实用堰型,堰上游面在 1 045 m 以上铅直,1 045 m 以下坡比为 1:0.1,堰顶上游面堰头为三圆弧曲线,下游为幂曲线,幂曲线与下游反弧段采用 1:0.75 的坡相连,反弧半径 12 m,挑射角 28°,反弧底高程 1 045.6 m,末端鼻坎高程 1 047.0 m,设计图如图 1 所示。

大坝基坑开挖过程中,对揭露出的大坝坝基重新进行补勘,坝基岩层物理力学参数见表 1。

根据新的坝基岩体物理力学参数复核原初设混凝土非溢流坝段、底孔混凝土坝段坝体及溢流坝段坝体稳定及坝基应力。根据《混凝土重力坝设计规范》^[9](SL319-2005),重力坝坝基面坝踵、坝趾的垂直应力应符合下列要求:在各种荷载组合下(地震荷载除外),坝踵垂直应力不应出现拉应力,坝趾垂直应力应小于坝基容许压应力。经复核,挡水坝体抗滑稳定及坝基应力计算结果分别见表 2、表 3。

由表 2 和表 3 可知,各种计算工况下,各种坝段坝体均不满足抗滑稳定要求,需重新进行坝体体型设计。

3.2 变更设计

坝基持力层第④层红砂岩,遇水易软化,物理力学指标会大幅减少。根据上述岩石力学参数复核,大坝在保证原体型尺寸不变情况下,坝体结构不稳定。为保证坝体稳定,大坝体型进行必要的变更。

变更后混凝土挡水坝坝体设计,坝顶宽 9 m,坝底最大宽度 36 m。大坝非溢流面上游 1 045 m 高程以上坡铅直,1 045 m 高程以下坡比 1:0.3,下游坡坡比为 1:0.95。溢流面采用 WES 实用堰型,堰上游面在 1 045 m 以上铅直,1 045 m 以下坡比为 1:0.3,堰顶上游面堰头为三圆弧曲线,下游为幂曲线,幂曲线与下游反弧段采用 1:0.75 的坡相连,反弧半径 12 m,挑射角 28°,反弧底高程 1 045.6 m,末端鼻坎高程 1 047.0 m。本次设计坝基与岩基接触面倾向上游 5°,以增加坝体抗滑稳定,如图 2 所示。

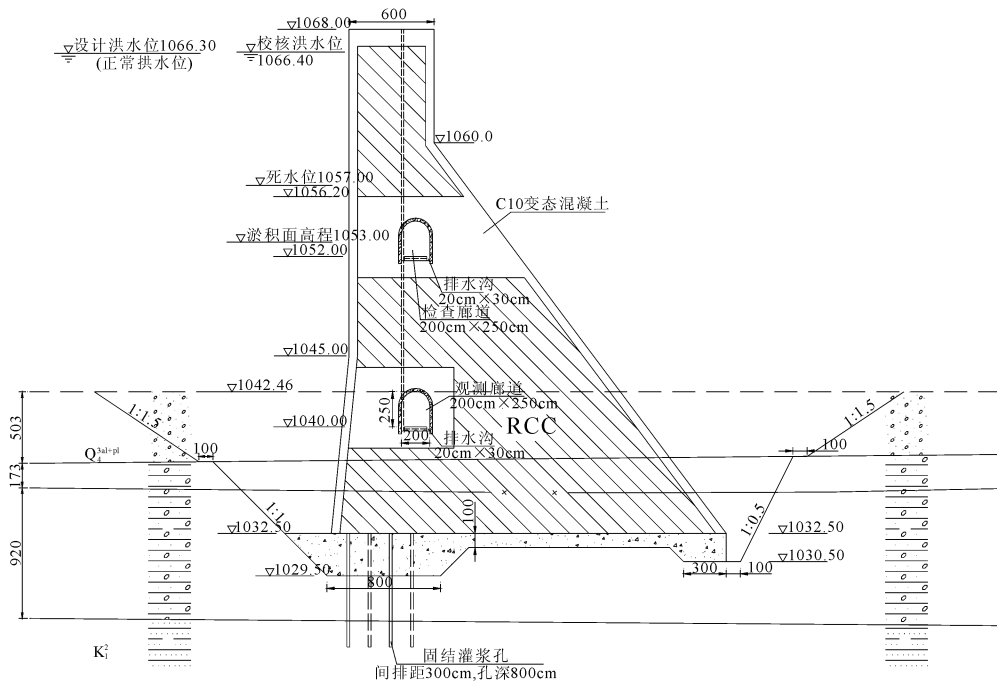


图 1 原挡水坝坝体设计图(高程单位:m)

表 1 坝址区岩体物理力学参数表

岩性	风化程度	干燥抗压强度 R_d /MPa	饱和抗压强度 R_b /MPa	软化系数 K_r	摩擦系数 f'		凝聚力 c' /MPa		变形模量 E_{50} /GPa	泊松比 μ
					岩石	混凝土	岩石	混凝土		
砂岩④	弱风化	14.7	3.7	0.25	0.5	0.6	0.3	0.3	2	0.29

表 2 混凝土非溢流坝段坝体稳定、坝基应力计算表

组合情况	工况	抗滑稳定安全系数 K' (抗剪断)	坝踵垂直应力 σ_y^d /kPa	坝趾垂直应力 σ_y^d /kPa
基本组合	正常蓄水位	1.762	98.94	586.02
	设计洪水位	1.866	94.53	557.61
特殊组合	完建未挡水	—	885.11	85.38
	校核洪水位	1.951	105.06	533.43

表 3 溢流坝段坝体稳定、坝基应力计算表

组合情况	工况	抗滑稳定安全系数 K' (抗剪断)	坝踵垂直应力 σ_y^d /kPa	坝趾垂直应力 σ_y^d /kPa
基本组合	正常蓄水位	2.006	11.66	780.32
	设计洪水位	2.348	71.04	798.74
特殊组合	完建未挡水	—	728.18	349.69
	校核洪水位	2.447	81.60	760.52

变更后复核混凝土挡水坝体抗滑稳定及坝基应力计算结果如表 4 和表 5 所示。

从表 4 和表 5 中可得:在基本组合情况下,即正常蓄水位及设计洪水位这两种工况下,无论是混凝土

土非溢流坝段坝体、还是底孔混凝土坝段或者溢流坝段坝体抗滑稳定安全系数均大于 3,满足规范要求;在特殊组合情况下,即完建未挡水及校核洪水位这两种工况下,抗滑稳定安全系数均大于 2.5,亦满足规范要求^[10];在以上各种计算工况下,坝基应力均小于砂岩允许的应力。

根据以上分析可知,变更设计的坝体断面满足抗滑稳定要求,坝踵没有出现拉应力,且坝趾垂直应力应小于坝基容许压应力。

4 坝基处理方案

4.1 原坝基处理方案

原初步设计混凝土坝溢流段和左岸非溢流段的坝基处理,先挖除上部 0~6.4 m 的淤积壤土及第四系壤土夹卵石层,高程 1 029.5 m~1 031.5 m,坝基坐落于砾岩层,水平分布为硬岩完整性好,不需要特殊处理,仅在坝踵处设有两排固结灌浆孔,深入基岩 8.0 m、排距 3.0 m,梅花型布置,起到加固应力集中区及帷幕作用,灌浆压力应通过现场试验确定,灌浆后的岩体透水性不大于 5 Lu。

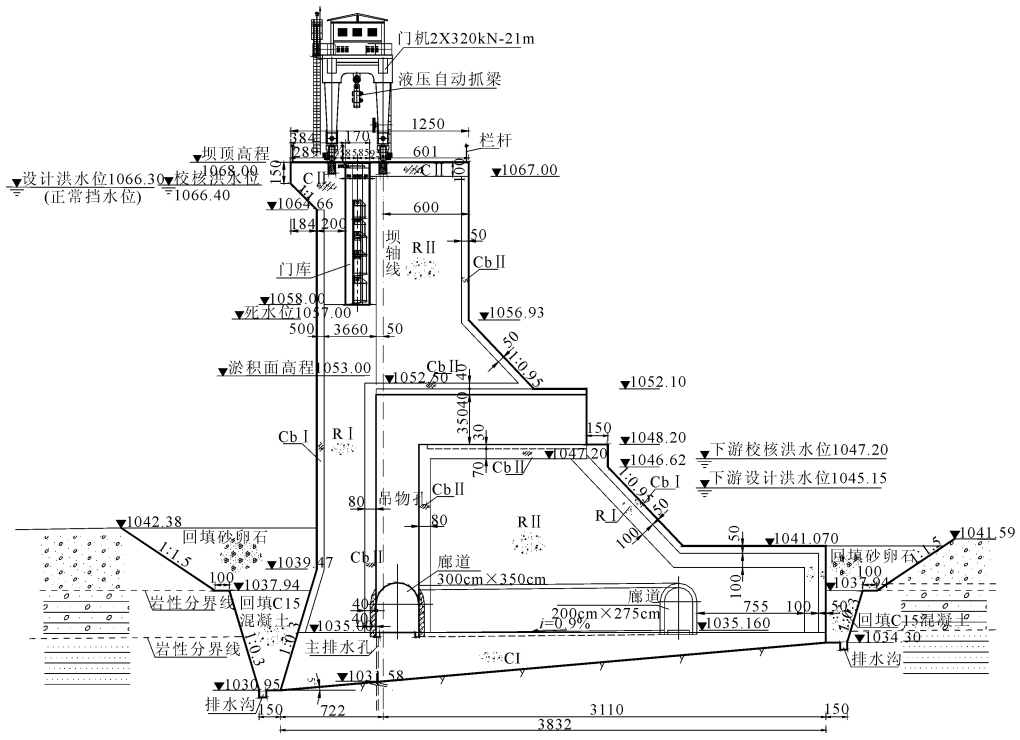


图 2 变更后挡水坝体设计图(高程单位:m)

表 4 非溢流坝段坝体稳定、坝基应力计算表

组合情况	工况	抗滑稳定安全系数 K' (抗剪断)	坝踵垂直应力 σ_y^0/kPa	坝趾垂直应力 σ_y^d/kPa
基本组合	正常蓄水位	3.015	254.68	449.21
	设计洪水水位	3.193	242.55	427.82
特殊组合	完建未挡水	—	705.26	205.92
	校核洪水水位	3.332	270.43	408.90

表 5 溢流坝段坝体稳定、坝基应力计算表

组合情况	工况	抗滑稳定安全系数 K' (抗剪断)	坝踵垂直应力 σ_y^0/kPa	坝趾垂直应力 σ_y^d/kPa
基本组合	正常蓄水位	3.065	115.61	731.39
	设计洪水水位	3.348	71.04	798.74
特殊组合	完建未挡水	—	578.09	456.01
	校核洪水水位	3.447	81.60	760.52

根据地质补充勘测报告,坝基钻孔压水实验,虽没有发现大的断裂,强透水带,但坝基岩体透水性为中等透水性,坝基底高程平均为 1 030.0 m,根据补充勘测报告,结合钻孔柱状图,计算坝基渗漏量。通过计算,坝基日渗漏总量分别为 53 378.50 m³,年总渗漏量为 1 948.32 万 m³,根据原初步设计可知,年允许渗漏量为 48 万 m³~78 万 m³,其中高程至 1 006.64 m 时,年渗漏量占总渗漏量 99.9%,故坝基主要解决该层以上渗漏问题,坝基渗漏问题即可解

决,本次变更采取帷幕灌浆处理,处理深度约 24.06 m。结合地质补勘报告,河床坝段建议帷幕灌浆深度 25 m~30 m。

右岸一级阶地初步设计对强透水层采取截渗墙处,本次维持不变,但截渗墙底高程为 1 047.40 m~1 046.40 m,参照地质补勘测报告,截渗墙底岩石透水性较大,结合钻孔柱状图,计算一级阶地渗漏量。通过计算,坝基日渗漏总量分别为 22 396.41 m³,年总渗漏量为 817.47 万 m³,根据原初步设计可知,年允许渗漏量为 48 万 m³~78 万 m³,其中高程至 1 021.64 m 时,年渗漏量占总渗漏量 95.6%,故右岸一级阶地主要解决该高程以上渗漏问题,渗漏问题即可解决,变更采取帷幕灌浆处理,处理深度约 24.75 m。结合地质补勘报告,右岸一级阶地坝段建议帷幕灌浆深度 25 m~30 m。

左岸坝肩根据地质补勘测报告,结合钻孔柱状图,计算左坝肩渗漏量。通过计算,左坝肩也需进行防渗处理,具体结合地质补勘报告,处理深度约 20 m。

总之,通过以上分析,根据地质补勘报告,结合渗漏量计算,无论是坝基还是坝肩(包括右岸土坝段)均需做防渗处理,设计采取防渗帷幕解决渗漏问题。

4.2 变更后坝基处理方案

根据地质补勘报告,坝基岩体以弱风化砂岩为

主,极软岩,岩体承载力不高,软弱岩带模量低,且砂岩遇水后软化特征明显,存在变形问题,为增强坝基岩体的完整性和稳定性,需进行处理;对于左坝肩,基础虽以砂岩为主,但坝体断面变化很快,坝体断面小,坝体基础岩体承载力等满足要求,故可不进行处理;对于右坝肩,基础以砾岩为主,各种力学性能等均能满足要求,亦可不进行处理。综上所述,对坝基岩体全部进行固结灌浆,固结灌浆深度 10 m~12 m,本次变更设计固结灌浆深度为 8 m,范围为整个坝基。

根据以上坝基存在的问题,对坝基及坝肩(包括土坝段)防渗处理方案为:坝基、坝肩岩体(包括土坝段)进行帷幕灌浆。坝基具体为:先挖除上部 0~6.4 m 的淤积壤土及第四系壤土夹卵石层,高程 1 029.58 m~1 031.58 m,然后在坝踵处浇筑 3.0 m 厚 C15 混凝土、坝趾处浇筑 2.0 m 厚 C15 混凝土、其余厚 1.0 m;在灌浆廊道内对下部砂岩进行灌浆处理,孔距 2.0 m,单排布置,灌浆深度根据渗漏量计算分析及地质补勘建议,深度为 25 m~27 m,灌浆压力应通过现场试验确定,灌浆后的岩体透水性应不大于 5.0 Lu。两坝肩岩体(包括土坝段)待大坝浇筑好,蓄水之前进行灌浆即可,孔距 2.0 m,灌浆深度根据渗漏量计算分析及地质补勘建议,深度为 25 m~27 m,两坝肩设计有灌浆平洞。同时在帷幕后设 1 道排水幕,平均孔深 16.0 m,孔距 2.0 m,倾向下游,顶角 10°;坝体断面较大,为降低坝体基础面浮托力,在下游排水廊道内布置有 1 排排水幕,平均孔深 10.0 m,孔距 4.0 m,倾向上游,顶角 10°。

根据坝基岩石特点,为增强坝基岩体的完整性和稳定性,对坝基河床段岩体全部进行固结灌浆(在有盖重情况下进行),范围为坝纵 0+036.19~0+132.99 段,固结灌浆孔间、排距 3.0 m,梅花形布置,共 9 排,灌浆孔深入基岩 8 m;对两坝肩,考虑到两岸边坡坡度偏陡(其中右岸 1:0.3,左岸 1:0.7 及 1:0.9),且坡面高差较大,为了填充混凝土坝及岸坡之间缝隙,增加锚着力和加强接触面间的密实性,对两岸坡进行接触灌浆,范围为坝纵:0+000~0+036.19 及 0+132.99~0+142.84 段,接触灌浆孔间、排距 3.0 m,梅花形布置,每孔灌浆控制面积约 6 m²。

5 结 语

本文针对柏岭寺水库工程混凝土重力坝软弱基岩问题,在坝体边坡,局部尺寸以及坝基等方面做出相应的变更,解决了工程基础存在的问题,并得出以下结论,以期类似水利工程设计提供参考。

(1) 水利工程地质情况的复杂性和重要性,设计时应充分考虑。

(2) 通过大坝设计尺寸的调整,增加了坝体体积与建基面,满足了各种工况下坝基应力均小于砂岩允许应力的要求。

(3) 基础防渗处理应充分考虑基岩在卸载后的回弹及两岸对其的顶冲作用。采用坝基、坝肩全部帷幕灌浆的方法可以解决渗漏问题,采用坝基、坝肩全部进行固结灌浆也可以增强坝基、坝肩岩体的完整性和稳定性。

参考文献:

- [1] 郭建业.混凝土重力坝抗滑稳定及应力控制标准研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [2] 张镜剑.具有软弱夹层基岩上混凝土重力坝抗滑稳定的刚体平衡法[J].华北水利水电学院学报,2011,(1):29-37.
- [3] 谢兴华,王国庆.深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J].岩土力学,2009,30(9):2708-2712.
- [4] 党发宁,熊 璐,王振华,等.西藏某水电站工程首部枢纽平衡防渗优化设计[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):1-8.
- [5] 杜延龄,许国安.岩基灌浆帷幕合理渗透性和深度的初步研究[J].水利水电技术,1980,(6):52-56.
- [6] 杨秀竹,陈福全,雷金山,等.悬挂式帷幕防渗作用的有限元模拟[J].岩土力学,2005,26(1):105-107.
- [7] 中华人民共和国水利部.SL62-94.水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,1994.
- [8] 中华人民共和国水利部.SL31-2003.水利水电工程钻孔压水试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [9] 中华人民共和国水利部.SL319-2005.混凝土重力坝设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [10] 中华人民共和国水利部.SL253-2000.溢洪道设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2000.