

结合工程实例浅谈水库原址扩建工程中的大坝防渗方案

阳廷凯 左艳波 汪炳权

云南省水利水电勘测设计院有限公司, 中国·云南 昆明 650021

摘要: 水库能否正常蓄水是水库能否产生效益的关键, 而大坝防渗体系的建立又是水库得以正常蓄水的关键, 其也是大坝安全的有力保障。如何选择安全、经济、实用的防渗方案, 是水库工程建设重点和难点。以曼么耐水库扩建工程为研究背景, 通过现场地质勘察对工程区地质条件进行评价, 结合地质条件、天然建筑材料及大坝现状, 提出了“黏土心墙+混凝土防渗墙+帷幕灌浆”的防渗方案, 分区布置, 封闭防渗, 保障大坝安全; 并对坝体进行了渗流稳定计算分析, 验证设计方案的可行性。这对水库扩建的工程实践有一定的参考意义。

关键词: 水库扩建; 防渗方案; 渗流稳定

A Brief Discussion on the Dam Anti-seepage Scheme in the Reservoir Expansion Project on the Original Site based on Engineering Example

Tingkai Yang Yanbo Zuo Bingquan Wang

Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650021, China

Abstract: Whether a reservoir can store water normally is the key to its profitability, and the establishment of a dam anti-seepage system is also the key to the normal storage of water in the reservoir, and it is a powerful guarantee for dam safety. How to choose a safe, economical, and practical anti-seepage plan is the key and difficult point in reservoir engineering construction. Based on the research background of the expansion project of the Manmonai Reservoir, the geological conditions of the project area were evaluated through on-site geological survey. Combined with the geological conditions, natural building materials, and the current situation of the dam, a anti-seepage plan of “clay core wall+concrete anti-seepage wall+curtain grouting” was proposed, which was distributed in zones, sealed and anti-seepage, and ensured the safety of the dam; And the seepage stability calculation and analysis of the dam body were carried out to verify the feasibility of the design scheme. This has certain reference significance for the engineering practice of reservoir expansion.

Keywords: reservoir expansion; anti-seepage plan; seepage stability

0 前言

随着水库下游灌区受水对象的变化(人口增多、灌区高标准农田建设、新增工业园区供水等), 原有的小型水库供水规模已不能满足灌区的用水需求, 在河道径流条件满足要求的情况下一般会选择进行水库扩建, 增大水库规模, 让其效益最大化: 通过扩建水库, 可加快推进农田水利基础设施建设, 增强抵御自然灾害的能力, 是巩固和提高粮食生产能力、保障粮食安全的关键举措; 实施水库扩建工程, 可极大地提高规划范围内城乡生活、工业和农业供用水量及供水保证率, 解决灌区水资源供需矛盾, 对灌区产业结构调整和国民经济的可持续发展具有重要支撑作用。

原址扩建大坝防渗体系分为四部分: 新建坝体、现状坝体、坝基、坝肩, 如何选择安全、经济、实用的防渗方案, 是水库工程建设重点和难点。

以曼么耐水库扩建工程为研究背景, 通过现场地质勘察对工程区地质条件进行评价, 结合地质条件、天然建筑材料及大坝现状, 合理确定大坝防渗方案, 并通过渗流稳定计

算验证方案的可行性。

1 工程概况

曼么耐水库位于景洪市勐养镇境内、澜沧江左岸支流勐养河的右岸支流南洋河上。水库于 1977 年 9 月动工兴建, 1984 年 12 月竣工。2010 年进行了除险加固, 形成现有规模(总库容 766 万 m^3), 是景洪市境内小(1)型骨干水利工程。

曼么耐水库扩建工程的建设任务是解决勐养镇坝区城乡生活兼顾农业灌溉及工业供水。扩建后的曼么耐水库正常蓄水位 806.00m, 总库容 1365.9 万 m^3 , 属于中型水库。水库工程由枢纽工程和输水工程组成, 其中枢纽工程由大坝、溢洪道和导流输水放空隧洞组成。

曼么耐水库现状大坝为均质土坝, 坝顶高程 800.00m, 坝顶长 245.0m, 坝顶宽 5.0m。上游坝坡坡比 1 : 2.9, 上游护坡采用混凝土预制块。下游三级坝坡, 坡比分别为 1 : 2.75, 1 : 3.0, 1 : 3.25, 下游坝脚设置排水棱体。

扩建后的大坝坝型为黏土心墙风化料坝, 坝顶高程 808.00m, 最大坝高 42.0m, 坝顶宽 8.0m, 长 300.0m, 坝顶

上游侧设置高 1.0m 的 C25 钢筋混凝土防浪墙。上游坝坡坡比分二级, 第一级 1 : 2.9, 第二级 1 : 3.0, 变坡处设戕台(原坝顶, 宽 5.00m), 采用 C25 混凝土预制块护坡; 下游坝坡坡比分三级, 第一级 1 : 2.75、第二级 1 : 3.0、第三级 1 : 1.5 (排水棱体), 变坡处分别设置宽 3.0m、2.0m 的戕台, 排水棱体以上采用混凝土网格梁植草护坡, 排水棱体采用干砌石护坡。黏土心墙顶宽 3.0m, 心墙上、下游坡比 1 : 0.25, 其上、下游侧各设置 1 层 2.0m 宽的反滤料和 1 层 2.0m 宽的过渡料。

2 工程地质条件及评价

2.1 坝址区工程地质条件

2.1.1 地层岩性

坝址区广布第四系(Q)松散地层: 砂、砂卵砾石、黏土、含砾(碎石)黏土、含砾淤泥质黏土、粉砂质黏土等, 基岩为中生界侏罗系中统花山组上段(J_2h^2): 粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩等。

2.1.2 水文地质条件

①含水(透水)层。

第一, 第四系残坡积、碎石土孔隙含水(透水)层。

分布于坝址区河床、阶地、岸坡, 残坡积层, 中等~强透水, $10 < q < 100\text{Lu}$, 属潜水。其中, 第四系残坡积层渗透系数大值均值为 $2.13 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 。

第二, 强~弱风化岩体裂隙含水(透水)层。

广泛分布于坝址河床两岸浅层, 一般埋深 25~40m, 中~强透水, $q=22.85 \sim > 100\text{Lu}$, 属裂隙含水透土层。其中, 坝基渗漏段透水率平均值为 60.12Lu; 左岸绕渗段透水率平均值为 22.85Lu; 右岸绕渗段透水率平均值为 38.45Lu。

②相对透土层及隔水层。

坝址区强风化基岩下带~弱风化~新鲜基岩为相对隔水层, 一般透水性均较弱($q < 5\text{Lu}$), 分布较为连续。其中强风化岩体透水率(q) 29.54Lu~155.58Lu, 属中等~强透土层; 弱风化岩体(q) 4.08Lu~110.95Lu 属弱~强中等透土层; 弱风化下部岩体透水率 $q < 10\text{Lu}$, 属弱透土层。根据压注水试验成果, 坝址相对不透水层($< 10\text{Lu}$)埋深为: 左岸坝肩约为 15.0m, 左坝肩至河床段约为 40.0m, 坝基约为 40.01m, 右坝基至河床段约为 46.35, 右岸坝肩约为 30.29m。

2.1.3 地震动参数

根据 1/400 万 GB18306—2015《中国地震动参数区划图》, 工程区本区 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度为 0.20g, 地震动反应谱特征周期为 0.45s, 相应的地震基本烈度为 VIII 度。

2.2 现状大坝工程地质评价

2.2.1 坝土

①大坝填筑土组成。

坝土层最大厚度 33.0m, 坝土多为褐黄色、灰黄、紫红色含砂高液限黏土, 局部为低液限黏土, 稍湿~湿, 可~

硬塑状, 部分为含砾(碎石)黏土, 砾(碎石)含量约 3%~6%, 局部达 8%。经取样和土工试验, 坝土粒径 2~50mm 不等, 多为 2~20mm, 分布不均匀, 属中等压缩性土。土样颗粒统计结果: 黏粒含量为 9.1%~40.8%, 平均值为 30.6%, 主要为高液限黏土、含砂低液限黏土, 据颗粒实验成果表明, 坝土各区间粒径含量离散性较大, 反映出坝土存在料性不均的问题。

②坝土渗流稳定分析。

经实验结果统计与计算, 坝土不均匀系数 $C_u > 8$, 不均匀系数 $C_c = 0.18$, 坝土为不良级配的黏性土, 坝土的细粒平均含量 $P = 35.9\% > 35\%$, 根据 GB50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》附录 M 土的渗透变形判别, 坝土的渗透变形类型为流土。经分析计算, 坝土不会产生渗透变形破坏。

2.2.2 坝基渗流稳定

两岸坝基表层的残坡积物易产生流土及接触流失; 河床坝基冲洪积物易产生管涌; 下伏强~弱风化岩体不存在渗透变形问题。

2.2.3 坝基渗漏及绕坝渗漏

坝址区分布的松散孔隙含水透土层、强~弱风化上带基岩裂隙含水透土层, 透水性弱~中等, 局部透水性较强。存在坝基及绕坝渗漏问题。

2.3 天然建筑材料

2.3.1 防渗土料场

土料场位于坝址左岸山体背坡, 呈长条状分布, 距离坝址运距小于 1km。料场地形为坡地, 场地宽厚, 地形坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$ 。料场区有用层为下部残坡积含砂质黏土及全风化上部黏土, 开采厚度 2.0~3.5m。料场有用层储量和质量满足防渗土料的要求。

2.3.2 风化料场

工程所需坝壳料从坝址区南部的玄武岩采石场商购。料场出露地层为三叠系上统小定西组中段(T_3x^2): 暗绿、黄绿色玄武岩、安山玄武岩夹凝灰岩, 有用层以强~弱风化为主。玄武岩采石场所生产的风化料质量和储量均满足大坝坝壳料填筑要求。

2.3.3 石料场

工程所需砗骨料及块石料从位于工程区东南部基诺山乡东南缘的亚诺村附近的亚龙石料场商购。料场出露的基岩为石炭系中统地层(C_2), 岩性为深灰、灰色中厚层~块状灰岩夹灰绿色粉砂质页岩, 开采面岩体多呈强~弱风化状态。亚龙石料场所生产的各类建材质量及储量均满足工程建设需求。

3 防渗方案设计

经过技术经济比较, 确定大坝扩建方案为现状大坝坝后扩建, 上游坝坡自原坝顶下游侧为起始点进行加高, 现状大坝坝顶为上游一级戕台, 宽 5.0m, 维持现状坝顶混

凝土路面。上游自现状坝顶高程 800.00m 到新建坝体坝顶 808.00m 设一级坝坡。

3.1 新建坝体防渗方案比选

设计烈度为Ⅷ、Ⅸ度时, 防渗体不宜采用刚性心墙的形式^[1]。结合工程地质条件、天然建筑材料, 新建坝体防渗体可以采用黏土斜墙、黏土心墙及沥青混凝土心墙等。

对本工程而言, 大坝仅加高 8.00m, 沥青心墙与现状坝体难以搭接, 且用量较少, 不够经济, 故不宜采用沥青混凝土心墙。

水库周边残坡积土层较厚, 储量丰富, 质量较好, 经调查, 土料丰富区为耕地及经济林地覆盖, 临时征地办理条件好, 工程区防渗土料丰富, 可就近开采土料做水库防渗使用。

黏土斜墙存在斜墙黏土与两岸坡基础防渗体的连接不便, 斜墙一旦发生开裂渗漏处理十分困难等问题; 且心墙较斜墙工程量相对较小, 土料场开采面积较小。

综上所述, 综合考虑地质条件、天然建筑材料、施工条件、环保水保及坝高等因素, 新建坝体采用黏土心墙进行防渗。

3.2 现状坝体防渗方案比选

3.2.1 混凝土防渗墙

混凝土防渗墙是在松散透水地基或土石坝(堰)坝体中连续造孔成槽, 以泥浆固壁, 在泥浆下浇筑混凝土而建成的, 起防渗作用的地下连续墙, 是保证地基稳定和大坝安全的工程措施。其优缺点为: 防渗性能和效果可靠; 墙体的渗透和力学性能可根据地层和结构要求进行设计和控制; 施工方法成熟, 检测手段比其他隐蔽工程成熟, 可以确保达到预期的目标; 可适用于各种地质条件, 尽管施工有难易之分, 但以目前的技术都可建成防渗墙; 施工的技术要求较高, 价格可能较高^[2]。

3.2.2 高压喷射灌浆

高压喷射灌浆是以高压水泥浆液或高压水流强力地冲击切割地层, 使水泥浆液与地层土粒掺混, 形成充填凝结体, 高压旋喷形成圆柱状, 摆喷和定喷则形成薄板状, 彼此连接形成帷幕用以阻隔地基渗流。高压喷射灌浆的优点是施工简单、速度快, 缺点是对地层敏感性强、缺少快速可靠的检测方法^[2]。

3.2.3 坝体劈裂灌浆

其优点在于浆液极易渗透到土体中的空隙, 不仅提升

土体防渗作用更增加土体密实度, 费用低。其缺点是必须具备较高的施工技术, 水下部分浆液凝固比较慢, 不能很好地保证帷幕质量, 并且可靠度低、检查难度大^[3]。

现状坝体坝土存在料性不均的问题, 综合地质条件、施工条件、管理条件、工程投资等因素, 现状坝体采用混凝土防渗墙进行防渗。

3.3 坝基及坝肩防渗方案

为减少坝基及绕坝渗漏, 防止渗漏对坝基及两岸边坡稳定产生不利影响, 在两岸及坝基混凝土防渗墙下做帷幕灌浆防渗。

3.4 防渗方案详细设计

3.4.1 黏土心墙

黏土心墙轴线即扩建坝体坝轴线, 黏土心墙顶宽 3.0m, 上、下游坡比均为 1 : 0.25, 最大底宽 13.3m, 心墙上、下游侧各设置 1 层 2.0m 宽的反滤料和 1 层 2.0m 宽的过渡料。心墙与现状坝体结合部位设 C25 混凝土灌浆盖板, 盖板厚度为 0.8m。

3.4.2 混凝土防渗墙

防渗墙轴线为扩建坝体坝轴线, 范围为坝横 0+040.00m 至坝横 0+250.00m, 全长 210m, 分为 35 个槽段。墙顶高程 790.00m, 底界为进入坝基强风化底界以下平均 2.0m, 墙厚 0.8m。防渗墙施工平台高程 787.00m, 其中高程 787.00m 以下为槽浇段, 采用 C25 混凝土, 高程 787.00m 以上为明浇段, 采用 C25 混凝土。防渗墙伸入黏土斜墙 3.0m。

3.4.3 帷幕灌浆

帷幕灌浆轴线位于防渗墙轴线上游 0.7m 处, 帷幕起止范围: 帷幕轴线平行坝轴线延伸至坝 0-075.68m 至坝 0+445.61m, 帷幕全长 521.29m。左右两坝肩帷幕边界以正常蓄水位与地下水位线交点为界。单排孔布置, 孔距 1.5m。帷幕灌浆底界为深入坝基 5Lu 以下 5m。防渗墙段灌浆顶界为防渗墙底界, 防渗墙两侧顶界为灌浆盖板, 两岸坡灌浆顶界为正常蓄水位 806.00m。帷幕灌浆分Ⅲ序进行, 坝土采用 1 : 3 混合浆液灌注, 基岩采用纯水泥浆灌注。

为保证灌浆效果, 防渗墙两侧至坝肩设厚 0.8m 宽 5.0m 的 C25 混凝土灌浆盖板。盖板下设 2 排 $\Phi 25$ 锚杆, 间距 3.0m, 排距 3.0m, 梅花型布置。

坝基、坝肩帷幕灌浆与坝体混凝土防渗墙及黏土心墙形成封闭的大坝防渗体系, 见图 1、图 2。

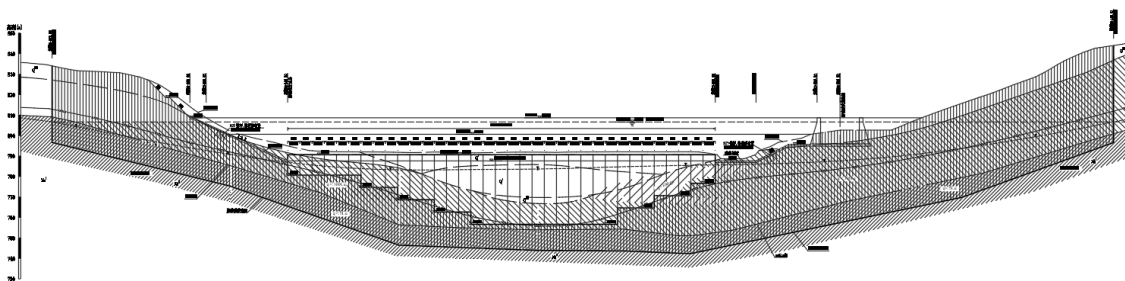


图 1 防渗设计坝轴线纵剖图

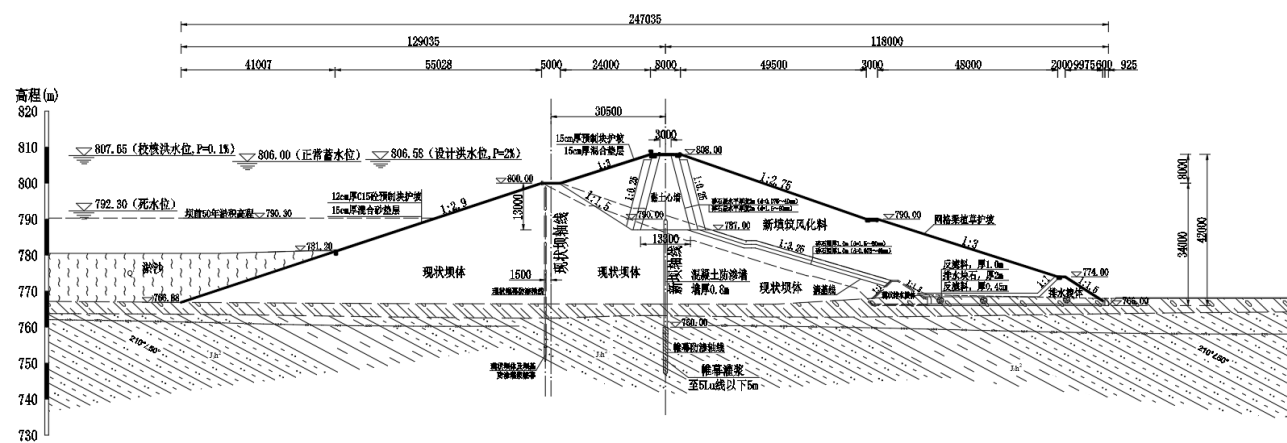


图 2 防渗设计横剖面图

4 大坝渗流稳定分析

4.1 计算工况及水位组合

渗流计算水位组合见表 1。

4.2 渗透区域划分及渗透系数取值

渗透区域的划分主要是根据坝体断面分区构成及坝基地质透水性进行划分。根据地勘资料并结合工程实际，大坝渗透区域划分及分区渗透系数取值见表 2。

4.3 坝体渗流计算及结果分析

计算断面采用坝体最大断面，采用 AutoBank7.7 水工设计软件进行计算分析。计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知，在正常蓄水位时，坝体单宽渗流量为 $0.45\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ，总渗流量约为 $103.5\text{m}^3/\text{d}$ ，年渗漏总量约为 $3.78\text{万 m}^3/\text{y}$ ，占正常库容 1196.30万 m^3 的 0.32% ，满足防渗要求。经计算，在校核洪水位至死水位工况下坝基土出逸比降均小于坝基冲洪积层允许比降 0.6 ，说明大坝渗流稳定是安全的。

表 1 渗流计算水位组合

计算工况		序号	上游水位（m）	下游水位（m）	备注
稳定渗流	死水位	1	792.30	无水	
	正常蓄水位	2	806.00	无水	
	50 年一遇设计洪水位	3	806.58	768.84	
	1000 年一遇校核洪水位	4	807.65	769.21	
非稳定渗流	水库水位正常降落（正常蓄水位→死水位）	5	806.00 → 792.30	无水	

表 2 渗流计算渗透系数采用值

分区		渗透系数（cm/s）	
序号	材料	Kx	Ky
I	均质土（现状）	2×10^{-4}	2×10^{-4}
II	风化石（现状）	8×10^{-3}	8×10^{-3}
III	排水棱体	6×10^{-2}	6×10^{-2}
IV	风化石（新）	4×10^{-3}	4×10^{-3}
V	黏土料（新）	1×10^{-5}	1×10^{-5}
VI	反滤料（新）	3×10^{-3}	3×10^{-3}
VII	混凝土防渗墙	1×10^{-7}	1×10^{-7}
VIII	帷幕灌浆	1×10^{-5}	1×10^{-5}
IX	河床冲积层	8×10^{-4}	8×10^{-4}
X	强风化基岩	1×10^{-4}	1×10^{-4}
XI	弱风化基岩	1×10^{-5}	1×10^{-5}
XII	淤沙	5×10^{-5}	5×10^{-5}

表 3 渗流计算成果表

序号	计算工况		单宽渗流量 (m ³ /s · m)	下游溢出比降
1	稳定渗流	死水位 792.30m	2.36×10^{-6}	0.000234
2		正常蓄水位 806.00m	5.26×10^{-6}	0.000342
3		设计洪水位 806.58m	5.45×10^{-6}	0.000345
4		校核洪水位 807.65m	5.88×10^{-6}	0.000361
5	非稳定渗流	水库水位降落 806.00m → 792.30m (正常蓄水位→死水位)	$5.26 \times 10^{-6} \sim 2.89 \times 10^{-6}$	0.000262

5 结语

水库能否正常蓄水是水库能否产生效益的关键，而大坝防渗体系的建立又是水库得以正常蓄水的关键，其也是大坝安全的有力保障。原址扩建大坝防渗体系分为四部分：新建坝体、现状坝体、坝基、坝肩，如何选择安全、经济、实用的防渗方案，是水库工程建设的重点和难点。

以曼么耐水库扩建工程为研究背景，通过现场地质勘察对工程区地质条件进行评价，结合地质条件、天然建筑材料及大坝现状，合理确定大坝防渗方案，并通过渗流稳定计算验证方案的可行性。

通过方案比选，最终确定“黏土心墙 + 混凝土防渗墙 + 帷幕灌浆”的防渗方案，分区布置，封闭防渗，保障大坝安全。

通过渗流稳定计算分析，各工况水位下坝体渗流量均较小，满足防渗要求，坝基土出溢比降均小于坝基冲洪积层允许比降，说明大坝渗流稳定是安全的，这也表明设计的防渗方案合理可行。这对水库扩建的工程实践有一定的参考意义。

参考文献：

[1] GB51247—2018 水工建筑物抗震设计规范[S].
[2] 高钟璞.大坝基础防渗墙[M].北京:中国电力出版社,2000.
[3] 吕绍文.水库坝体防渗加固处理方案的比选研究[J].云南水力发电,2022,38(11):139-142.

作者简介: 阳廷凯(1989-), 男, 中国云南昭通人, 本科, 工程师, 从事水工结构研究。