

紫坪铺水利枢纽工程面板堆石坝垫层过水 渗流分析计算

刘 达¹, 李连侠, 廖华胜¹, 潘光宇²

(1. 四川大学 水力学及山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 中国水利水电第七工程局, 四川 郫县 611730)

摘 要: 运用深度平均渗流模型, 结合二维立面渗流模型对紫坪铺面板堆石坝垫层过水渗流情况进行了渗流量、渗流场及渗透坡降的数值模拟计算, 得到了不同垫层渗透系数下的坝体单宽渗流量, 并得出了只要将垫层前缘层渗透系数控制在 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 左右, 则该垫层过水方案是合理可行的结论。计算模型及结果分析对该工程和类似工程都有一定的参考价值。

关键词: 面板堆石坝; 垫层; 深度平均渗流模型; 紫坪铺工程

中图分类号: TV5; TV121; TV12

文献标识码: B

文章编号: 10012184(2006)增12079204

1 前 言

紫坪铺水利枢纽工程位于成都西北 60 km 的岷江上游河段, 以农业灌溉和城市供水为主, 兼有防洪、发电和环境保护等综合功能。枢纽建筑物主要由混凝土面板堆石坝、溢洪道、泄洪排沙洞、冲沙放空洞和引水发电系统组成。混凝土面板堆石坝最大坝高 156 m, 水库总库容 11.12 亿 m^3 。电站总装机容量 76 万 kW, 多年平均发电量 34.17 亿 kW·h。工程总投资 69.76 亿元, 工程建设总工期 6 年。

在下闸蓄水安全鉴定工作完成后, 按照工程总体设计方案及《四川岷江紫坪铺水利枢纽工程下闸蓄水安全鉴定报告》的结论, 工程应下闸蓄水发电。但由于种种原因, 工程 2 号导流洞未能下闸进行封堵改造, 因此而无法按原计划实现工程渡汛的设计方案。为了能够最大限度地避免工程即将面临的安全风险问题, 根据实际情况, 设计单位在较短的时间内再次对原 2 号洞下闸封堵改造及工程渡汛方案进行了研究, 以寻求风险度较小的方案。其中提出的水库蓄水方案要求大坝混凝土面板应浇筑至 845.0 m 高程, 但在大于 50 年一遇洪水时, 水库最大水位均高于 845.0 m 高程; 500 年一遇洪水时, 库水位高于 845.0 m 高程约 16.5 m。也就是说, 若遭遇大于 50 年一遇洪水时, 大坝垫层需要过水。

面板堆石坝在施工渡汛期、垫层在没有混凝土面板的保护下直接过水在国内外工程中已有不

少先例^{[1]-[3]}。垫层在混凝土面板堆石坝中扮演着特殊的角色, 垫层既起防渗作用, 又起排水作用。垫层的这种特殊作用使面板堆石坝的安全度有很大提高。因此, 在施工期往往由堆石体在没有混凝土面板保护的情况下临时抵挡施工期洪水。在实际工程中, 垫层承受的可能最大渗透坡降取决于其承受的可能最大水头差与其厚度。以往研究表明, 垫层承受的实际可能最大水头约为总水头的 80%~90%。Aguam illipa 坝是一个在一期面板浇筑后挡水的例子, 该坝坝高 187 m, 1992 年汛期, 该坝挡水水深达 80 m, 其中垫层直接挡水深 30 m, 实际观测到的通过垫层的水头损失约为 85%。珊瑚溪坝采用沙浆护面垫层直接挡水, 挡水水头为 49.26 m, 垫层在坡面法线方向最大渗透坡降为 43。天生桥一级水电站坝高 178 m, 在临时坝体抵挡百年一遇洪水时, 垫层料承受的比降约为 50^[2]。

笔者所述的紫坪铺面板堆石坝工程, 虽然垫层过水部分只有 16.5 m, 但由于上下游水位差较大, 最大约为 120 m, 其渗透破坏的可能性和渗流量的影响不容忽视, 这也是方案成立与否的主要控制因素之一。

为了解该方案垫层过水渡汛的渗流稳定和渗流量, 笔者对设计提出的下闸蓄水方案——面板堆石坝上部高程 861.5~845 m 段的垫层过水渡汛的渗透稳定和渗流量进行了分析计算, 旨在为方案的可行性提供技术支持。

2 渗流计算模型及计算参数

渗流计算采用获美国国家自然科学基金 2002 年度精品奖 (Premier Courseware of 2002) 的 ICW 软件。ICW 为互动、实时、可视化确定性和随机地下水模拟的软件。该项目得到了美国国家自然科学基金资助。该软件代表了目前能进行地下水互动、实时、可视化分析和监测等最先进的综合性随机模拟系统。该模拟系统可进行各向异性介质中地下水水流流场及非均匀流场污染物运移的模拟计算。这一系统目前正在 Michigan State University, Portland State University 和 Oregon State University 等多所美国大学的本科和研究生教学中使用, 模型介绍详见文献[4]。

本次计算采用深度平均平面二维模型, 结合典型剖面二维模型计算本工程垫层过水的渗流量、坝体浸润线及逸出边界渗透坡降; 此外, 对垫层附近区域水头降落趋势采用概化的局部模型进行模拟。

深度平均平面二维模型和概化的局部模型见图 1 和图 2。

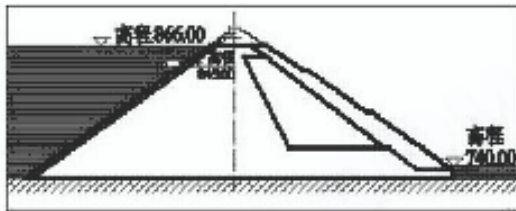


图 1 深度平均模型示意图

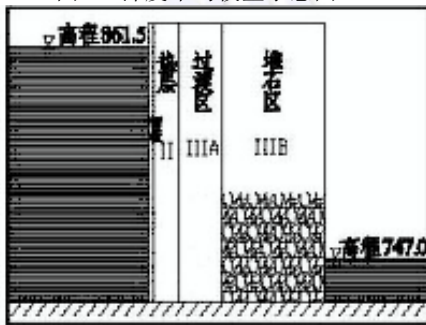


图 2 垫层附近区域概化模型示意图

本次计算垫层过水渗流计算工况见表 1。计算中采用的各种材料的地质参数系由设计单位所提供, 本次计算采用的基本参数见表 2。

3 渗流计算结果及分析

(1) 渗流量。表 3 为采用深度平均模型和剖面模型计算的不同喷层渗透系数在 $p=0.2\%$ 洪水工况时的渗透流量。

由表 3 可知, 两种模型计算的渗流量接近。

从计算得到的渗流量看, 当喷层渗透系数

表 1 垫层过水渗流计算工况表

项 目	P /%				
	5	2	1	0.5	0.2
设计洪峰流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	4 450	5 340	6 030	6 720	7 630
出库最大流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1 658	1 757	1 810	1 852	1 915
水库最高水位 /m	845	851	854.4	857.2	861.5
下游水位 /m	/	745	745	745	747

表 2 渗流计算参数表

编号	坝料分区		主要设计指标		
	名称	来源	干密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	空隙率 /%	渗透系数 $/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
II	垫层区料	尖尖山爆破加工料	2.30	15.4	2.5×10^{-3}
II B	反滤料	河床沙卵石筛分	2.35	16.1	
IIIA	过渡料	尖尖山爆破料	2.25	17.3	5.3×10^{-1}
IIIB	主堆石区料	尖尖山爆破料	2.16	20.6	2.1

表 3 P=0.2% 洪水工况垫层过水渗透流量计算结果表

模型	渗透系数	单宽渗流量		总渗流量	
	$/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
剖面	1.0×10^{-3}	0.096 7	96.75	48.37	48 373.8
	1.0×10^{-4}	0.013 3	13.32	6.66	6660.8
深度平均	1.0×10^{-3}	0.117 5	117.53	58.77	58 765.6
	1.0×10^{-4}	0.013 6	13.58	6.79	6 790.6
	1.0×10^{-5}	0.001 3	1.34	0.67	668.1

注: 总渗流量按坝体长度等于 500 m 计算。

$K=0.001 \text{ cm/s}$ 时, 坝体单宽渗流流量已达 100 L/s, 渗流量过大; 当 $K=0.000 1 \text{ cm/s}$ 或 $0.000 01 \text{ cm/s}$ 时, 单宽渗流流量约为 14 L/s 和 1 L/s。

因此, 就渗流量控制而言, 喷层渗透系数控制在 $0.000 1 \sim 0.000 01 \text{ cm/s}$ 为宜。

(2) 渗流场及渗流压力。

图 3 为计算的沙浆喷层渗透系数 $K=0.001 \text{ cm/s}$ 、 $0.000 1 \text{ cm/s}$ 和 $0.000 01 \text{ cm/s}$ 时的坝体浸润线。



图 3 深度平均模型计算得到的坝体浸润线图

可见, 当沙浆喷层渗透系数接近垫层渗透系数时, 由于渗流量较大, 浸润线在坝体内仍有一定坡度, 下游坡面逸出点距下游水位约 8 m; 当沙浆喷层渗透系数进一步降低时, 坝体浸润线平坦, 下

游水位相当,渗流量将显著降低。

图4为 $K = 0.001 \text{ cm/s}$ 、 0.0001 cm/s 和 0.00001 cm/s 时垫层附近概化模型计算的水头在各材料层的降落规律。

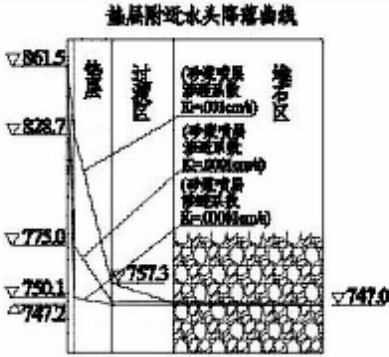


图4 垫层附近水头降落曲线计算结果示意图

可见,当 $K = 0.001 \text{ cm/s}$ 时,由于喷层渗透系数与垫层的接近,水头在浸入垫层前的损失较小。但由于垫层后紧接相对透水较强的堆石区,其水位与下游水位接近,因此,垫层内承受的水头差将很大,约达70 m,其渗透坡降亦较大;当 $K = 0.0001 \text{ cm/s}$ 时,水头在面板(或喷层)内损失75%左右,垫层内承受的水头降低到26 m,渗透坡降将降低许多;当 $K = 0.00001 \text{ cm/s}$ 时,水头在面板(或喷层)内损失96%,垫层内承受的水头降低到4 m左右,渗透坡降大大降低。因此,从降低垫层渗透压力考虑,喷层渗透系数宜控制在 0.00001 cm/s 左右为佳。

对于图4中的水头降落曲线计算结果,可用水力学中的平底均质地下河槽浸润曲线的公式进行近似验证。一般平底均质地下河槽浸润曲线(图5)可由式(1)描述^[5]:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \frac{k}{s} \cdot (h_1^2 - h_2^2) \quad (1)$$

式中 q 为单宽渗流量; k 为所在土层的渗透系数; h_1 为浸润线121处的水头; h_2 为浸润线222处的水头; s 为121至222断面间的水平距离。

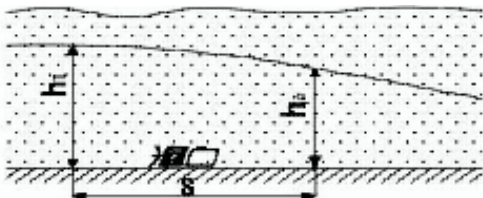


图5 平底均质地下河槽浸润曲线计算示意图
根据质量守恒定律,通过喷层、垫层和过渡层

的单宽流量在理论上是相等的。由式(1)按数值模型计算得到的各过水层的水头值计算可得:通过喷层的流量为 $0.0644 \text{ m}^3/\text{s}$,垫层的流量为 $0.0689 \text{ m}^3/\text{s}$,过渡层的流量为 $0.0668 \text{ m}^3/\text{s}$ 。显而易见,三者的数值十分接近,说明文中采用的概化模型解释水头在各材料层的降落规律是可行的、合理的。

图6为典型剖面在 $K = 0.0001 \text{ cm/s}$ 时计算的渗流流场及水头等值线图。由图6可见,渗透影响主要发生在入渗附近(即垫层附近)和逸出处。渗透压力在坝体段沿程分布较均匀,为低压区,水头接近下游水位。因此,入浸附近区域和逸出处将是渗透破坏的可能易发部位。

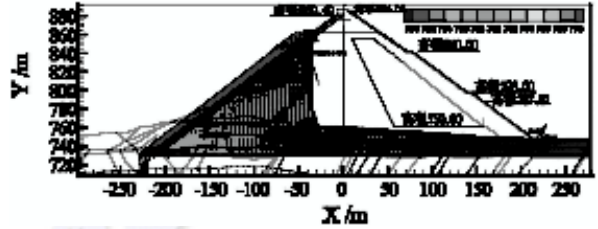


图6 库水位高程861.5 m 垫层过水典型剖面渗流场及渗透压力场计算结果($K = 10^{-4} \text{ cm/s}$)图

(3) 渗透稳定分析。

将 $K = 0.001 \text{ cm/s}$ 和 $K = 0.0001 \text{ cm/s}$, $P = 0.2\%$ 计算工况下计算的典型剖面、典型位置的渗透坡降计算结果列于表4。

表4 各工况出逸处渗透坡降计算结果表

模型	喷层渗透系数 $/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	渗透坡降	
		垫层	出逸点
剖面	1.0×10^{-3}	32	0.38
	1.0×10^{-4}	11.7	0.12
深度平均	1.0×10^{-3}	/	0.43
	1.0×10^{-4}	/	0.04

由图表可见,渗透坡降最大区域发生在入渗边界,下游坡脚处出逸坡降最大约为0.4。由于喷层和面板尺寸太小,立面模型需非常密的网格方能分辨该层特性,计算的渗透坡降将会偏大,因此,表4中垫层的渗透坡降仅作为参考。为研究垫层附近区域渗透特性,将垫层按图2模型进行概化。表5为使用概化模型计算出的各工况垫层处的最大渗透坡降。

由表5知,当 $K = 0.001 \text{ cm/s}$ 时,坝体下游坡面逸出处渗透坡降最大为0.4,垫层内渗透坡降为25~27,其值已超过该垫层的临界坡降,垫层有产生渗透破坏的可能性; $K = 0.0001 \text{ cm/s}$ 时,

表5 各工况垫层处的最大渗透坡降计算结果表

项目	P /%				临界坡降	破坏坡降
	2	1	0.5	0.2		
设计洪峰流量 /m ³ ·s ⁻¹	5 340	6 030	6 720	7 630		
出库最大流量 /m ³ ·s ⁻¹	1 757	1 810	1 852	1 915		
水库最高水位 /m	851	854.4	857.2	861.5	13.4	72.6
下游水位 /m	745	745	745	747		
总水头	106	109.4	112.2	114.5		
K = 0.001 cm/s	25	25	26.5	27		
K = 0.000 1 cm/s	7.5	7.5	7.9	8.1		
K = 0.000 01 cm/s	0.94	0.97	0.99	1.01		

坝体下游坡面逸出处渗透坡降最大约为 0.12, 垫层内渗透坡降为 8 左右, 小于该层临界坡降 (13.4), 安全系数约为 1.6, 但其值远小于该垫层的破坏坡降 (72), 垫层产生渗透破坏的可能性较低; 当 K = 0.000 01 cm/s 时, 坝体下游坡面逸出处渗透坡降接近于 0, 垫层内渗透坡降约为 1 左右, 远小于垫层允许坡降, 垫层不会产生渗透破坏。

综上所述, 垫层发生渗透破坏的可能性与喷层渗透系数的大小有关。当其渗透系数为 0.000 1 cm/s 左右时, 垫层发生渗透破坏的可能性较低; 在 0.000 01 cm/s 左右则不会发生渗透破坏; 出逸边界处渗透坡降较小, 不会发生渗透破坏。因此, 为使垫层过水时不发生渗透破坏, 建议喷层渗透系数应控制在 0.000 01 cm/s 左右。

4 结论

当 K = 0.001 cm/s, 0.000 1 cm/s 和 0.000 01 cm/s 时, 坝体单宽渗流流量分别为 100 L/s, 14 L/s 和 1 L/s。

当沙浆喷层渗透系数接近垫层渗透系数时, 浸润线在坝体内仍有一定坡度, 下游坡面逸出点距下游水位约 8 m; 当沙浆喷层渗透系数继续降低时, 坝体浸润线与下游水位相当, 渗流量降低显著。

当 K = 0.001 cm/s 时, 水头在浸入垫层前的损失较小, 垫层内承受的水头差约为 70 m; 当 K = 0.000 1 cm/s 时, 水头进入垫层前已损失 75%, 垫层内承受的水头降低约为 26 m; 当 K = 0.000 01 cm/s 时, 垫层内承受的水头降低为约 4 m。

垫层发生渗透破坏的可能性与喷层渗透系数的大小有关。当其渗透系数为 0.000 1 cm/s 左右时, 垫层渗透坡降约为 8.1, 小于该垫层临界坡降, 安全系数约为 1.6, 且远小于该层破坏坡降, 发生渗透破坏的可能性很低; 在 K = 0.000 01 cm/s 左右则不会发生渗透破坏; 逸处边界处渗透坡降较小, 不会发生渗透破坏。

就渗流量的控制和渗透稳定而言, 只要将喷层渗透系数控制在 0.000 01 cm/s 左右, 本工程制定的垫层过水方案应是合理可行的。

参考文献:

- [1] 司洪洋. 关于砂卵石混凝土面板堆石坝垫层渗流的思考 [J]. 大坝观测与土工测试. 2000. 24(2): 1~7.
- [2] 朱建华. 面板堆石坝施工渡汛期的渗透稳定问题 [J]. 水力发电. 1991. 9(2): 31~34.
- [3] 田 斌, 戴会超, 童富果. 混凝土面板堆石坝施工渡汛断面坝坡稳定性研究 [J]. 水力发电学报. 2005(2): 77~80.
- [4] 廖华胜, 高明军, 李连侠. 沙湾水电站左案坝肩“地窗式”防渗方案优化计算与分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版) 2005. 37(4): 1~6.
- [5] 吴持恭. 水力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.

作者简介:

- 刘 达 (19812), 男, 吉林汪清人, 在读硕士研究生, 研究方向: 水工水力学
- 李连侠 (19782), 男, 河南南阳人, 在读博士研究生, 研究方向: 水工水力学
- 廖华胜 (19642), 男, 广西田东人, 博士生导师, 教授, 博士, 研究方向: 水工水力学
- 潘光宇 (19632), 男, 四川达县人, 项目部副经理, 高级工程师, 从事水电工程施工技术与管理工作. (责任编辑: 李燕)

省水电学会运行专委会 2006 年学术交流会在峨眉山市召开

2006 年 11 月 6~7 日, 省水电学会运行专委会 2006 年学术交流会在峨眉山市召开。出席会议的有来自专委会成员单位、省学会及有关单位的代表 20 余人。专委会主任委员、龚嘴水力发电总厂厂长李攀光主持会议并在会上详细介绍了近期召开的四川省水力发电工程学会第六次会员代表大会以及中国水力发电工程学会在京召开换届大会的具体情况, 使与会代表对全国总会和省学会的近况有了了解。他还向与会代表介绍了我国能源政策, 并详细阐述了水电在其中的重要地位, 李厂长在会上还向代表们介绍了近期召开的其他几个会议的情况。省学会常务副理事长兼秘书长马怀新在会上就学会换届情况以及电力体制改革中出现的问题进行了阐述, 并希望专委会成员单位的领导切实参与到专委会活动之中, 共同为在川的水电厂运行献计献策。专委会何诚秘书长也在会上向与会者传达了有关事项。在会议进行的学术交流中, 二滩水电厂韦业、龚嘴水力发电总厂杨华蓉、映秀湾水力发电总厂刘守书等先后在会上介绍了各自的经验。引起与会者的关注。在完成了预定的议程后会议圆满结束。