

回龙抽水蓄能电站上库渗流模拟计算与防渗新工艺

吴海亮,牛贺道,张有山

(黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003)

摘要 将回龙抽水蓄能电站上库裂隙岩体分为主干裂隙系统和其间的裂隙岩块系统,构成具有导水和贮水双重功能的水文地质体,建立双重裂隙系统三维渗流数值模型进行渗流计算,为库盆采取全封闭防渗措施及防渗新工艺提供了决策依据。经过优化分析,上库采用了在坝前及构造带浇筑钢筋混凝土面板、其余部位挂网喷混凝土的全封闭组合防渗新工艺,降低了工程投资。通过现场喷混凝土试验验证,各项性能指标均满足设计要求。

关键词 渗流 双重裂隙 喷混凝土 回龙抽水蓄能电站

中图分类号 :TV223.4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)01-0054-03

Seepage calculation for upper reservoir of Huilong Pumped Storage Power Station and new technique for seepage control//WU Hai-liang, NIU He-dao, ZHANG You-shan(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract :The rock mass of the upper reservoir of the Huilong Pumped Storage Power Station was divided into the dominating and subordinate fracture system, thus, the hydrogeological structure with the function of water transmission and water storage was constructed. A three-dimensional numerical model for seepage calculation was developed for the double fracture system, providing a basis for decision-making in adoption of full-closed anti-seepage measure and new techniques for seepage control in reservoir area. Based on an optimal analysis, the placement of reinforced concrete slab was adopted in construction of structural belt and in front of the dam, and a new full-closed combined anti-seepage technique with reinforced meshes hanged for shotcrete was adopted in the rest parts. The use of the techniques reduces the engineering investment, and all the indexes of shotcrete meet the design requirement in field experiment.

Key words :seepage ; double fractures ; shotcrete ; Huilong Pumped Storage Power Station

南阳回龙抽水蓄能电站装机 120 MW,由上库、下库及引水发电系统组成。上库流域面积 0.14 km²,总库容 113 万 m³;下库流域面积 8.625 km²,总库容 129 万 m³。由于上、下库库容较小,天然径流量有限,可供调蓄的水量不多,分配到上水库的允许渗漏量应控制在 600 m³/d 以内,而上库库盆地质构造带较多,天然渗流量约 8 500 m³/d,因此,为减少电能损失、保证电站正常运行,必须采取经济合理的防渗措施。

1 水文地质条件

上库为一近似扇形的小型集水盆地,南北长 300 m,东西宽 250 m,库周大部分地段山梁单薄。库盆北西为一峡谷出口,东面为江淮分水岭,南侧和北侧均被支沟切割。

库区基岩岩性主要为燕山晚期细粒花岗岩,局部为似斑状花岗岩,新鲜状态下多呈块状构造。地表岩石风化较强,从全风化到微风化,各部位风化深度不

等。库区构造特征主要表现为节理裂隙和节理密集带,而许多节理密集带贯穿于库区,具有与断层相似的工程特性,成为库水外渗的主要通道。这些节理密集带主要有北东走向的 L₃₆、L₃₇、L₄₉、L₅₀、L₅₁以及北西走向的 L₄₈和 L₅₃等,倾角一般在 70°~85°之间。

库盆外围三面临深切沟谷,库周山梁即为地表水及地下水的分水岭,大部分地段的地下水位都低于水库正常蓄水位。右岸和后缘山体比较雄厚,地表有多处泉水出露,地下水埋藏较浅,两坝肩及库盆左岸山体相对单薄,高程较低,地下水埋藏较深。

特殊的地形特征、构造条件和地下水分布特点决定了上库存在严重的渗漏问题。

2 双重裂隙系统渗流模拟计算分析

2.1 渗流模型的原理及建立^[1,2]

常规的连续介质渗流理论难以模拟库区裂隙岩体结构所固有的渗流特性,为了更精确地了解上库

库盆渗流情况,采用了双重裂隙系统渗流数值模型进行渗流计算分析。

根据裂隙渗流的原理,裂隙渗流分布主要取决于控制裂隙发育的岩性条件和地质构造条件。将控制渗流总体分布且起主导渗透作用的大裂隙定义为裂隙岩体中的主干裂隙网络,而将主干裂隙网络间的岩块定义为裂隙岩块。由主干裂隙网络和其间的裂隙岩块所构成的具有相对导水和贮水功能的水文地质体称为双重裂隙系统。该定义不仅考虑到裂隙系统的发育特征和分布规律,更重要的是考虑了裂隙岩体的渗透机制。

双重裂隙系统渗流数值模型如下:

$$\begin{cases} G_f H_f + R_{sf} H_{sf} = E_f \\ R_{f1} H_{f1} + R_{s1} H_{s1} = E_{s1} \\ R_{f2} H_{f2} + R_{s2} H_{s2} = E_{s2} \\ \vdots \\ R_{fm} H_{fm} + R_{sm} H_{sm} = E_{sm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G_f 为主干裂隙网络渗透矩阵; H_f 为主干裂隙网络结点上的水头; R_s 为裂隙岩块渗透矩阵; H_s 为裂隙岩块中的结点水头; R_{sf} 和 H_{sf} 的下标 f 表示裂隙岩块与主干裂隙网络相衔接的计算单元项; R_f 为与主干裂隙网络相邻接的裂隙岩块单元的渗透矩阵; E_f 为主干裂隙网络的源汇项及边界水头流量项; E_s 为裂隙岩块中的源汇项及边界水头流量项; 下标 $1, 2, \dots, m$ 为裂隙岩块的个数。

根据上库地形地质条件,计算范围选取为 $800 \text{ m} \times 700 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),在单元划分中,主要考虑了构造带、岩层风化带、岩块结构、混凝土面板、灌浆帷幕和坝体等地质结构和防渗结构体,从地表向下共分 15 个厚度层,划分的总节点数为 36198,总单元数为 34503 (见图 1)。确定合理的边界条件,对不同特性的主干裂隙和裂隙岩块赋予不同的地质参数,建立三维渗流数值模型。

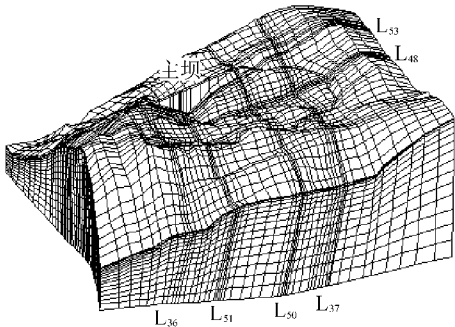


图 1 三维渗流计算单元立视图

2.2 渗流计算及分析

初步拟定几种防渗方案,分别为库周进行帷幕灌浆、节理密集带两侧浇筑钢筋混凝土面板或两者

组合方案,帷幕灌浆比较不同的深度,混凝土面板比较不同的宽度,但未采取全封闭措施。

结合电站运用情况,计算工况分为正常蓄水位和低水位两种,不同方案库区综合渗漏量根据两种工况运用时间换算得出。根据计算结果绘制综合渗漏量随帷幕灌浆深度和混凝土面板宽度的变化曲线,分别见图 2 和图 3。

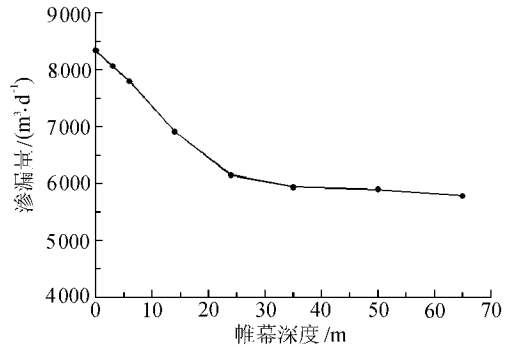


图 2 渗漏量随帷幕深度变化曲线

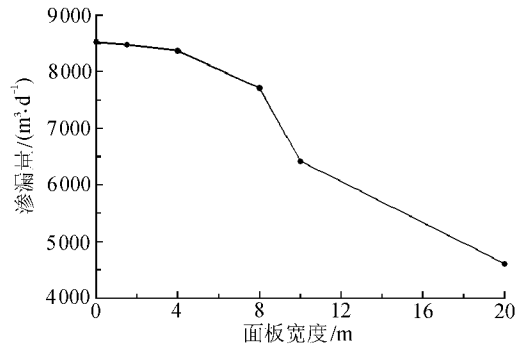


图 3 渗漏量随面板宽度变化曲线

从计算结果及变化曲线可以得出以下初步结论:

a. 随着帷幕深度的增加,渗漏量变化幅度越来越小,深度超过 35 m 以后,对库盆渗漏量的影响已经非常有限。帷幕深度为 65 m 时,渗漏量仍高达 $5780 \text{ m}^3/\text{d}$,约为允许渗漏量的 10 倍。因此,从技术角度看该方案是不可行的。

b. 随着面板宽度的增加,渗漏量变化幅度增大,说明采用面板铺盖防渗的作用大于帷幕灌浆。但面板宽度为 20 m 时,渗漏量为 $4610 \text{ m}^3/\text{d}$,而估算投资已接近推荐方案。因此,对库盆局部进行面板铺盖也是不可行的。

c. 两种防渗型式组合方案的计算结果可以得出类似的结论,因此,采用帷幕灌浆防渗及面板局部铺盖防渗措施难以满足上库防渗要求,需要采取全封闭防渗措施。

d. 在无任何防渗措施的自然情况下,节理密集带的单位面积渗流量为 $0.86 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$,远大于裂隙岩体的单位面积渗流量 $0.19 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 。可见,节理密集带应作为库盆全封闭防渗的重点区域。

3 库区防渗新工艺

3.1 传统防渗工艺及材料

目前,国内外抽水蓄能电站对库盆采用全封闭防渗的材料主要为钢筋混凝土、黏土、沥青、土工膜等,衬护型式多为整个库盆采用单一防渗材料或分库底、库岸采用两种防渗材料的组合方式。如天荒坪抽水蓄能电站上库采用沥青混凝土面板,十三陵抽水蓄能电站上库采用钢筋混凝土面板,河南宝泉抽水蓄能电站上库则采用黏土护底、沥青混凝土面板护坡的防渗方案。这些防渗材料及型式均能取得较好的防渗效果,但需要对库盆进行大量的开挖规整,加上材料本身的因素,工程造价较高,施工不便。

3.2 库区防渗工艺及方案

鉴于业主对电站投资的限制要求,在设计过程中,重点研究了新型的防渗工艺与材料,同时拟定传统的全封闭防渗方案进行比较分析。

根据三维渗流分析的结果,库区纵横交错的节理密集带渗流量较大,是库水外渗的主要通道,对上库的渗漏起控制作用,而其他裂隙岩块系统单位渗流量较小。据此认为,应根据不同的地质构造及渗流特性采用不同的防渗型式,进行区别对待,对于裂隙岩块系统的细小裂隙和风化层,考虑在满足防渗要求的条件下采用新型简单的防渗材料及型式。

喷混凝土一般作为边坡、隧洞围岩的支护材料,曾小范围应用于一些渠道边坡与坝体上游坡面的防渗,而用于库盆防渗至今未见报道。喷混凝土具有较高的强度与良好的耐久性,也具有一定的防渗功能,同时还可以随地形喷射,不受地形条件限制,可节省大量开挖量,不需要设置伸缩缝。喷混凝土防渗效果比传统防渗材料差,但通过掺加外加剂、改进施工工艺等措施,提高其抗渗性能,可以满足裂隙岩块系统的防渗要求。

综合分析,拟定了不同地质构造部位采用不同防渗材料的全封闭组合防渗方案:对节理密集带采用钢筋混凝土面板带状防渗,坝前死水位以下库底局部加铺钢筋混凝土面板,其余部位采用挂网喷混凝土防渗,其中,喷混凝土的面积约占整个库盆防渗面积的40%(指规整面积)。主要结构尺寸如下:钢筋混凝土面板厚20 cm,每隔8 m设一道伸缩缝,用紫铜片止水,底部设10 cm厚无砂混凝土垫层,喷混凝土平均厚15 cm。

经反复论证及试验研究,上库采用了该防渗方案,其综合渗漏量计算值为 $183\text{ m}^3/\text{d}$,满足防渗要求。与其他全封闭防渗方案相比,可以节约工程投资1000万元以上,且施工简易灵活。

3.3 喷混凝土工艺试验验证

3.3.1 试验基本情况

利用喷混凝土进行抽水蓄能电站的上库区防渗,目前还是一项新技术,为了验证防渗效果及可行性,同时也为了研究配合比、防裂措施、施工工艺和对受喷面不同地形地质条件的适应性,确定各种参数,为实际施工积累经验,在上库选择了一块面积约 1400 m^2 的场地进行了湿喷混凝土试验。

喷混凝土标号为C20W12F150,喷厚15 cm,4种基本配合比见表1,钢筋网采用直径6.5 mm钢筋,间距12.5 cm,现场编制铺设,锚杆采用长2.5 m、直径20 mm的螺纹钢,间距1.5 m。为增加强度及抗渗、抗裂性能,促进快速凝结,混凝土中掺加减水剂、防水剂、速凝剂及聚丙烯纤维。为便于对比研究,将试验区等面积划分为10个区,在各区喷混凝土试验过程中,结合实际情况及测验结果对配合比及施工工艺加以改进。

表1 喷混凝土基本配合比参数

编号	水	水泥	砂子	石子
01HP	0.41	1	2.256	1.634
02HP	0.39	1	2.120	1.540
03HP	0.44	1	2.380	1.864
04HP	0.39	1	2.050	1.610

3.3.2 试验结果

对喷混凝土进行的试验结果表明,抗压强度、抗折强度、抗渗指标和抗冻指标均能够满足设计要求,采用这种防渗结构型式是可行的。喷混凝土各项性能指标平均值如下:抗压强度37.2 MPa,抗折强度5.8 MPa,抗渗指标大于1.4 MPa。各种配合比的混凝土抗压强度平均值为37.2 MPa,强度偏高,可能是水泥掺量过多,或是减水剂的影响。

通过本次试验的对比研究,得出了一些初步结论^[3]。在设计及施工中应注意以下问题,以提高喷混凝土的性能指标。

a. 混凝土中增加纤维和防水剂能提高混凝土的抗裂性和抗渗性;对于坡面较陡的部位需要掺加速凝剂,促进其快速凝结,减少混凝土回弹损失。

b. 喷射方式应采用自下而上的方式,回弹料基本散落在已喷完的混凝土面上,不影响正在施工的混凝土质量,可以确保一次完成喷射混凝土,有利于保证质量与加快施工进度。但需要搭设悬空排架,避免出现孔洞,形成渗水通道。

c. 在新老混凝土搭接处喷混凝土时,要用高压风彻底清理回弹料及其他杂物,形成的坡度要平顺。

d. 应及时对喷完的混凝土进行养护,减少裂缝的产生。可以采用草帘等覆盖洒水养护,保持混凝土面湿润,缓解昼夜温差。

(下转第69页)

方量,最后再求总方量。由于一个项目有可能不会按顺序输入桩基号地面线文件,如要计算总方量,需要先对桩基号排序,其算法复杂。以快速排序为例,其复杂度在最坏情况下为 $O(n^2)$, 平均情况为 $H(n \lg n)$ 当地面线文件多达上百个时,计算速度慢,且还要按照桩基值查找相应的地面线文件,因此非常耗时。堤类工程 CAD 软件采用了数据库技术,借助数据库的自动排序,可以按桩基值快速找到相应的地面线文件,再利用面矢量算法求出工程量,既方便又准确、快速。

2.3.4 ActiveX 技术的应用,提高了软件的自动化程度

由于软件涉及计算、绘图、概预算等方面,众多软件的集成,相互之间的转换与调用要求灵活多变,以适应用户的需求。软件利用 ActiveX 技术,实现了不同部件的共享与调用。

2.3.5 为后续软件的开发准备了通用的组件

水利工程中,土方量计算与图形显示、工程估算、稳定计算等都是需要的,我们将这些模块设计成

组件,以便快速移植到其他工程中。

3 结 语

中小型水利工程 CAD 软件在异构软件集成上采用 ActivX 技术,在计算、绘图、概预算等功能之间可自由切换;人机交互性强;土方量计算采用面矢量算法,并结合数据库技术,简洁快速;数据输入及地面线和断面显示等采用可视化技术,直观形象地帮助判断。软件呈现在用户面前的是友好的界面,熟悉、灵活的操作流程,不用再‘学习’就可快速上手,在太仓市推广应用中得到好评,极大地提高了工作人员的设计效率。

参考文献:

- [1] LOMAX P. VB 与 VBA 技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] MCFARLANE S. AutoCAD 数据库连接[M]. 罗阿理·卢迪,译. 北京:机械工业出版社,2001.

(收稿日期 2004-09-30 编辑 熊水斌)

(上接第 56 页)

4 结 论

a. 回龙抽水蓄能电站上库地形地质条件复杂,将裂隙岩体划分为主干裂隙系统和裂隙岩块系统,采用非连续介质双重裂隙系统理论建立三维渗流模型进行渗流计算,较好地解决了连续介质渗流理论计算误差较大的问题,提高了渗流计算的准确性,为库区防渗方案的确定提供了可靠依据。

b. 经过专家鉴定与试验验证,可以认为,对于库区地形复杂的岩基表面,采用大面积喷混凝土防渗的新工艺,技术上是可行的,能够达到很好的防渗效果,可以节约大量的开挖量及混凝土量,从而节约大量的工程投资,具有一定的推广应用价值,但应注意严格控制配合比与施工工艺。

喷混凝土防渗工艺还有待于水库蓄水后的考验及其他生产实践的验证,并进一步研究完善。

参考文献:

- [1] 王恩志,王洪涛,孙役. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(4):400-406.
- [2] 王恩志,李昂,毛文然,等. 回龙抽水蓄能电站上库岩体三维渗流分析[J]. 水力发电学报,2002(1):96-100.
- [3] 章小君. 回龙抽水蓄能电站上库湿喷混凝土防渗试验[J]. 人民长江,2003,34(9):48-51.

(收稿日期 2004-10-14 编辑 熊水斌)

(上接第 59 页)

c. 解决了大网笼的制作问题。对于 10 m^3 左右的大网笼,里面又装的是石料,还要用推土机推到位,因此对网笼强度要求较高,若均用 8 号铅丝不但浪费,而且手工操作困难。经过试验,提出了以 8 号铅丝作骨架、以 12 号铅丝编网的人工制作工艺,较好地处理了强度与编网操作间的矛盾。

d. 首次提出了在大网笼中使用稻草、麦秸、玉米秸秆等作软料代替柳料起到缓流落淤的作用,可有效解决抢险料物不足的问题,同时也减少了柳枝砍伐量,有利于保护环境。另外,稻草、麦秸、玉米秸秆作软料用机械装料时更为方便,也便于调整软料与石料比例,以适应抗拒不同流速的需要。

参考文献:

- [1] 罗庆君. 防汛抢险技术[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.
- [2] 刘宗耀,杨灿文,王正宏,等. 土工合成材料工程应用手册[M]. 第 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [3] 张宝森. 土工合成材料软帘堵漏试验效果分析[G]//包承纲,杨光照. 土工合成材料防渗反滤和排水技术的研究与实践. 武汉:武汉出版社,2001:241-249.
- [4] 张宝森,沈秀珍,程征. 土工合成材料在渗水(流土)抢险中的应用研究[J]. 人民黄河,2003(3):40-41.
- [5] 崔建中,张宝森,张喜泉. 土工合成材料在黄河河道整治工程抢险中的应用[J]. 人民黄河,2003(3):42-43.
- [6] 杨红波. 合金钢丝网石笼在长江堤防护岸工程中的应用[J]. 浙江水利科技,2003(1):47-48.

(收稿日期 2004-10-15 编辑 熊水斌)