

水布垭大坝左岸岩溶发育规律及渗透性分析

陈祥军¹, 马凤山², 王思敬¹, 程国明²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 利用水布垭大坝左岸山体灌浆平硐现场的调查结果, 对防渗帷幕线剖面不同高程灌浆平硐的面溶蚀率和最大溶蚀洞径进行分区统计分析, 获得了防渗帷幕线剖面岩体溶蚀特性. 在此基础上, 结合区域地质资料和地貌资料, 得出大坝左岸山体岩溶发育规律. 左岸山体岩溶发育在垂直方向从上到下逐渐减弱, 水平方向从远河岸端向近河岸端逐渐增强, 存在集中发育区并受岩层面控制等. 最后对山体的渗透性进行了探讨, 提出帷幕工程优化的初步建议. 对大型溶蚀洞穴系统进行封堵后, 帷幕灌浆时应对不同地区分别对待, 有些地带可以简化帷幕施工, 甚至可以不进行帷幕施工.

关键词 溶蚀特性, 面溶蚀率, 渗透性分析, 水布垭大坝

中图分类号: TU46+2 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2004)03-0256-05

1 工程背景

水布垭大坝修建在湖北省清江流域, 设计蓄水位 400 m, 最大坝高 233 m, 是当今世界上最高的面板堆石坝, 目前正在紧张而有序的施工. 库区为山地丘陵地貌, 清江是区内最低侵蚀基准面, 总体流向为东西向. 库区内出露地层从寒武系至第四系均有分布, 主要岩性为滨海浅海相的碳酸盐岩夹碎屑岩. 其中石灰岩中岩溶发育, 岩溶有明显的成层性, 并且由清江河床向分水岭地段逐渐抬高. 水库与相邻水系的分水岭地带存在连续完整的碎屑岩或岩溶强度弱的碳酸盐岩隔水层, 不具备水库向相邻水系渗漏的条件^①.

坝址位于“S”河段的中部直线段, 上下游流向均为近东西向, 如图 1. 坝址区出露的主要地层有: 石炭系中统黄龙组白云岩与灰岩(C_{2h}), 二叠系下统马鞍山组砂岩与页岩(P_{1ma}), 二叠系下统栖霞组灰岩(P_{1q}), 茅口组灰岩(P_{1m}), 二叠系上统龙潭组页岩与泥灰岩(P_{2l}). 坝址位于一个宽缓向斜的东翼, 岩层呈单斜构造, 走向与河谷斜交, 倾向上游偏左岸. 左岸呈缓倾视逆向层状岸坡, 右岸呈缓倾视顺向层状岸坡. 坝址区的断层主要为陡倾角张(扭)性断层, 优势走向为 NNE, NNW, NE. 二叠系下统栖霞组与茅口组灰岩中岩溶发育. 栖霞组分为 15 段(P_{1q}^{1-15}). 地质勘探资料表明^[1], P_{1q}^{14} 和 P_{1m} 属于强岩溶化岩层, $P_{1q}^4, P_{1q}^5, P_{1q}^7, P_{1q}^9, P_{1q}^{11}, P_{1q}^{12}$ 等属于中等岩溶化岩层, $P_{1q}^1, P_{1q}^2, P_{1q}^3, P_{1q}^6, P_{1q}^8, P_{1q}^{10}, P_{1q}^{13}, P_{1q}^{15}$ 等属于弱岩溶化岩层.

在初步设计中, 大坝两岸设帷幕防渗. 左岸防渗帷幕端点及下限均接在岩溶作用不发育的栖霞组第三段灰岩上, 帷幕线近 1 800 m, 深 200 多 m, 帷幕工程量很大. 为了考察大坝左岸帷幕优化的可能性, 随着灌浆平

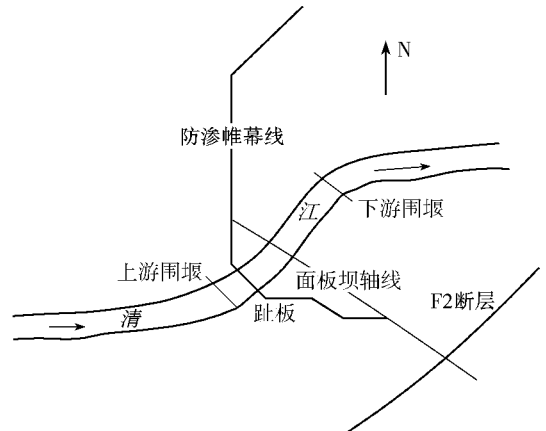


图 1 大坝坝址平面示意图

Fig.1 Plan layout of dam site

硐开挖施工进度,我们对左岸灌浆平硐进行了较为详细的地质调查.大坝左岸共设 5 条灌浆平硐(见图 2),高程分别为 200 m、240 m、300 m、350 m、400 m.5 条灌浆平硐中发育的洞穴都进行了详细的观察记录.将不同高程的灌浆平硐中的岩溶资料按里程进行统计分析,主要分析面溶蚀率和最大溶蚀洞径.通过上述资料的分析,得出了沿防渗帷幕线上岩体溶蚀特性.结合区域地质和地貌资料,总体上获得了大坝左岸山体的岩溶发育规律.在此基础上对大坝左岸山体的渗透性进行了初步分析.本次研究的结果,与其他的地质勘探手段所获得的结果相结合,可以帮助现场的地质、设计、施工等方面工作人员更清晰的认识岩体的岩溶发育规律,从而更准确地确定防渗帷幕优化的可能性与实施方案.

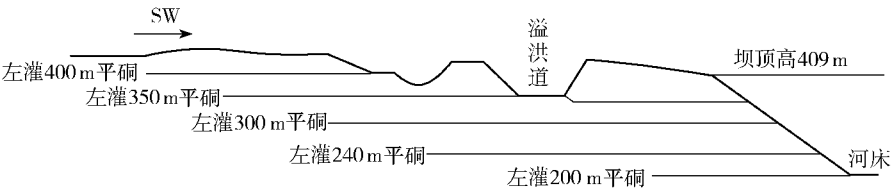


图 2 大坝左岸灌浆平硐布置图

Fig. 2 Distribution of grouting tunnels on left bank of dam

2 防渗帷幕线剖面岩体溶蚀特性分析

2.1 分析方法

通过溶蚀发育特征来分析溶蚀岩体渗透特征是国内外研究人员一致采用的研究思路^[1~4].岩体溶蚀强度可以用溶蚀率来表征.溶蚀率又分为体积溶蚀率、面溶蚀率、线溶蚀率.其中体积溶蚀率一般用于必须加强勘探的重点地区,需要用钻探、地球物理勘探等手段相结合,获得溶洞的空间位置和形态.在地表或开挖面上进行调查时,一般用面溶蚀率或线溶蚀率.本次研究中,在平硐开挖面上进行调查,考虑到岩溶形态不仅仅是溶蚀裂隙和大的溶蚀洞穴,在一些部位发育有较多的溶孔和小的溶蚀洞穴,线溶蚀率不可能正确反映岩体溶蚀强度,因此选用面溶蚀率作为统计指标来研究岩体溶蚀强度.

对现场调查资料,按 50 m 为一个区间,统计各区间的面溶蚀率.统计方法如下:在图 3 所示的分析区域内,第 i 个分析区间内有 m 个洞穴,每个洞穴的面积为 S_{ik} ,则这个区间的面溶蚀率

$$p_i = \sum_{k=1}^m S_{ik} / 50h$$

其中 h 为洞高.

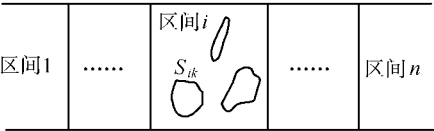


图 3 面溶蚀率分区统计示意图

Fig.3 Sketch map of areal ratio of corrosion

各平硐分区间统计完后,绘制面溶蚀率分布图.分布图的横轴为里程,50 m 刻度,从平硐远离河岸的一端开始计数.纵轴为面溶蚀率,每刻度为 0.02.为了能够更好的对比各平硐间岩溶发育特征,考察岩溶在空间上的发育规律,将各平硐的面溶蚀率分布图按平硐的平面投影位置复合成一个图.复合后的图横轴为里程,与平硐实际位置一致.纵轴为面溶蚀率,而不是高程位置.这点与一般剖面图不同.

溶蚀洞穴的洞径也可以用来表征岩体溶蚀强度.在现场量测每个溶蚀洞穴的洞径是按 50 m 为一个区间,统计各区间内的最大溶蚀洞径.与面溶蚀率的分析方法一样,各平硐分区间统计完后,绘制最大溶蚀洞径分布图.分布图的横轴为里程,50 m 刻度,从平硐远离河岸的一端开始计数.纵轴为区间最大溶蚀洞径,每刻度为 2 m.也将各平硐的分布图按平硐的平面投影位置复合成一个图.

2.2 平硐岩体面溶蚀率统计分析

防渗帷幕线剖面各平硐岩体面溶蚀率统计结果如图 4 所示.从图 4 可以看出,沿防渗帷幕线剖面上岩体的溶蚀强度在垂直方向从上到下逐渐减弱.在 400 m 平硐和 350 m 平硐中,都出现了面溶蚀率超过 0.1 的区间,说明在这些区间岩体溶蚀强烈.特别是 350 m 平硐的 650 ~ 950 m 区间,几个连续分区间的面溶蚀率都较高,说明此处存在一个较大范围的强溶蚀区.300 m 平硐中除 450 ~ 500 m 区间存在较强的溶蚀外,其他区间岩体溶蚀弱.240 m 平硐整体岩体溶蚀弱.200 m 平硐中除 250 ~ 300 m 区间存在轻微的溶蚀外,其他区间岩体基本没有溶蚀.岩体的溶蚀强度在垂直方向上表现出明显的发展继承性.400 m 平硐的 250 ~ 300 m 区间与 350 m 平硐的 50 ~ 100 m 区间垂直投影位置相隔不远,溶蚀强度逐渐减弱.350 m 平硐的 650 ~ 950 m 区间与 300 m 平

硐的 450 ~ 500 m 区间、240 m 平硐的 200 ~ 300 m 区间垂直投影位置也相隔不远,溶蚀强度逐渐减弱。

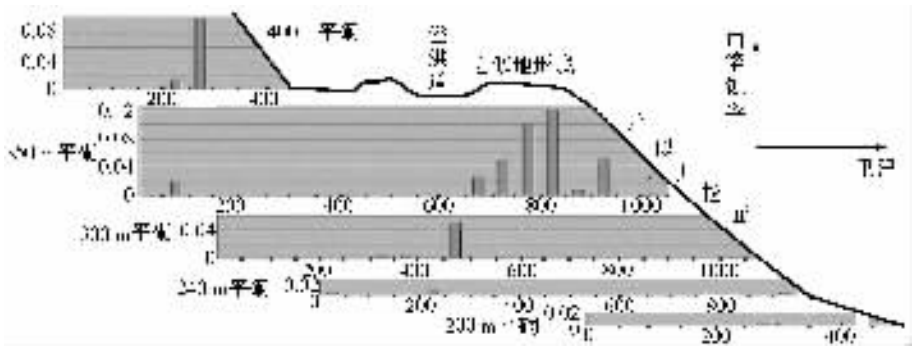


图 4 大坝左岸灌浆平硐面溶蚀率分布
Fig.4 Distribution of areal ratio of corrosion of grouting tunnels on the left bank of dam

图 4 还反映出,沿防渗帷幕线剖面上岩体的溶蚀强度在水平方向上存在集中发育区.400 m 平硐的 250 ~ 300 m 区间、350 m 平硐的 650 ~ 950 m 区间、300 m 平硐的 450 ~ 500 m 区间,这些区间的岩体溶蚀强度明显比同一平硐的其他区间强.岩体的溶蚀强度在水平方向上的另一个特点,是总体存在着从远河岸端向近河岸端逐渐增强的趋势.这种变化趋势在 350 m 平硐中出现最为明显,远河岸端只有个别区间有轻微溶蚀,而近河岸端则存在较大范围的强溶蚀区.在其他平硐中这种变化趋势表现不是很明显,特别是 300 m 平硐,较强的溶蚀发生在平硐中部的 450 ~ 500 m 区间,近河岸端的区间岩体溶蚀反而很弱。

2.3 平硐岩体最大溶蚀洞径分布

防渗帷幕线剖面各平硐岩体最大溶蚀洞径分布见图 5.图 5 中所反映出的防渗帷幕线剖面岩体溶蚀强度在垂直方向和水平方向上发育规律与图 4 基本相同.两个图对比,总体上面溶蚀率高的地方最大溶蚀洞径也大.但图 5 中所反映出的溶蚀强度的强弱对比不像图 4 那样强烈,有些区间面溶蚀率很低而最大溶蚀洞径比较大,说明区间内可能存在着稀疏的洞穴;有些区间面溶蚀率较高而最大溶蚀洞径比较小,说明区间内可能存在着较密集的洞穴。

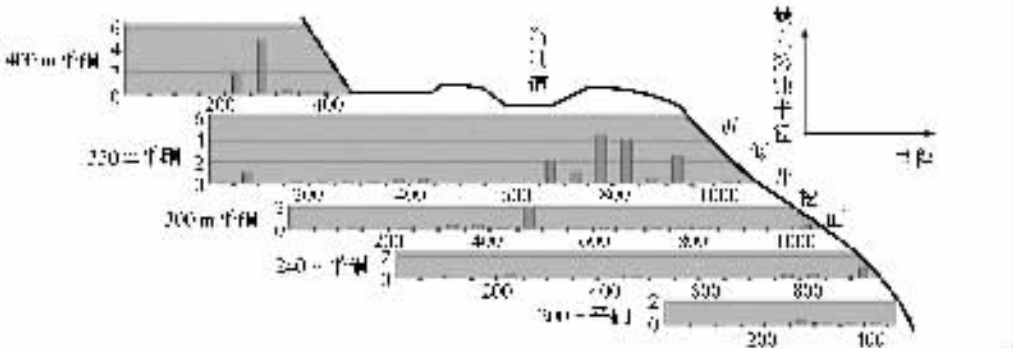


图 5 大坝左岸灌浆平硐最大溶蚀洞径分布
Fig.5 Distribution of maximal diameter of solution caves on the left bank of dam

2.4 剖面岩体溶蚀特性

面溶蚀率和最大溶蚀洞径的统计分析结果说明,防渗帷幕线剖面岩体的溶蚀强度存在明显的规律,这种规律与岩溶发育的基本规律是一致的.在垂直方向上,随着地表水下渗深度的增加,水的溶蚀能力减弱,岩体的溶蚀也会逐渐变弱.最大溶蚀洞径逐渐变小反映岩体的岩溶形态从大溶洞到溶蚀裂隙或小的溶洞再到溶孔的变化,面溶蚀率逐渐变小也反映岩体总的溶蚀强度在逐渐减弱.在水平方向上,由于清江是区内最低侵蚀基准面,地表水下渗后最终要汇入清江,近河岸端比远河岸端承受更多的地下水的溶蚀.另外,河床下切后,受卸荷作用的影响,近河岸端的岩体比远河岸端的岩体裂隙更为发育.这两个原因造成岩体的溶蚀强度从远河岸端向近河岸端逐渐增强,面溶蚀率和最大溶蚀洞径的统计分析结果基本上印证了这一结论。

岩溶发育是一个由很多因素控制的过程.防渗帷幕线剖面岩体的溶蚀强度除表现出岩溶发育的基本规律外,受本区岩性、构造和地貌等条件的影响,也存在独有的发育规律.溶蚀强度在水平方向上的集中发育区充分说明了岩性对岩体溶蚀强度的控制作用.现场岩性调查发现,高程 400 m 平硐的 200 ~ 300 m 区间对应 P_{1q}^7 和 P_{1q}^9 ,高程 350 m 平硐的 50 ~ 100 m 区间对应 P_{1q}^4 和 P_{1q}^5 ,高程 300 m 平硐的 450 ~ 500 m 区间对应 P_{1q}^{11} 和 P_{1q}^{12} ,高程 240 m 平硐的 850 ~ 930 m 区间对应 P_{1q}^9 ,这些区间岩溶较为发育,对应的岩性则都是中等岩溶化岩层,岩溶最为发育的高程 350 m 平硐的 650 ~ 950 m 区间对应的则是强岩溶化岩层 P_{1q}^{14} 和 P_{1m} .调查过程中,量测了溶蚀洞穴的走向,高程 400 m 平硐 200 ~ 300 m 区间的洞穴走向为 5° ,高程 350 m 平硐 50 ~ 100 m 区间的洞穴走向为 340° ,高程 350 m 平硐 650 ~ 950 m 区间的洞穴走向为 345° 、 45° 、 55° ,高程 300 m 平硐 450 ~ 500 m 区间的洞穴走向为 15° .这些洞穴的走向与坝址区主要断层的优势走向一致,说明岩溶基本上是沿着区内的陡倾角张(扭)性断层发育.岩层层面构造对岩溶的发育也有明显的控制作用.在高程 350 m 平硐的 7-4 施工支硐中发育一个大型溶洞(对应平硐里程为 700 ~ 750 m 区间),开始支硐开挖在边墙上揭露出 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的洞口,后来追踪揭露出 $6\text{ m} \times 15\text{ m}$ 左右的大溶洞,溶洞明显受层面控制,没有切穿岩层,而是沿层面向下延伸.地貌对岩溶的控制也是很明显的,高程 400 m 平硐的 250 ~ 300 m 区间与高程 350 m 平硐的 50 ~ 100 m 区间垂直投影,与地表邹家沟附近的溶蚀洼地在同一个位置.

3 大坝左岸山体渗透性探讨

通过对防渗帷幕线剖面岩体溶蚀特性的分析,可以进一步探讨大坝左岸山体岩溶发育规律.平硐所揭露的岩层,除属于弱岩溶化岩层的 P_{1q}^1 、 P_{1q}^2 、 P_{1q}^3 外,还包括了左岸坝址区所有岩层.帷幕线方向与主要构造线方向成一定角度相交,帷幕线切过了左岸坝址区的一些大的断层带.左岸帷幕线延伸近 1 800 m,从河床一直到高程在 500 m 以上的山体上,基本上穿透了左岸坝址区的次级地貌单元.因此,防渗帷幕线剖面岩体溶蚀特性也基本反映了大坝左岸山体岩溶强度发育规律.可以预计,大坝左岸山体岩溶强度发育也存在以下特征:在垂直方向,从上到下逐渐减弱;在水平方向,从远河岸端向近河岸端逐渐增强并存在集中发育区,以及受岩层面控制等.

尽管平硐开挖未揭露栖霞组第三段灰岩(P_{1q}^3),由于岩体的溶蚀强度在垂直方向从上到下逐渐减弱,平硐中 P_{1q}^4 岩层岩溶已经比较微弱(除高程 350 m 平硐 50 ~ 100 m 区间,由于其上面高程 400 m 平硐 200 ~ 300 m 区间洞穴有继承性溶洞发育), P_{1q}^3 在 P_{1q}^4 的下面,加之 P_{1q}^3 本身是弱岩溶化岩层,其岩体的溶蚀强度可以肯定是非常微弱的. P_{1q}^3 可以作为相对隔水层,将防渗帷幕的端点与其衔接,形成“相接式”帷幕布置形式,是安全可靠的.

从现场调查结果看,大坝左岸防渗帷幕范围内山体中既存在大型溶蚀洞穴系统,也有大量的中小型溶蚀洞穴和溶蚀裂隙.根据邹成杰的划分^[5],按渗漏通道形态,大坝左岸岩溶渗漏应为“复合型渗漏”,既有管道型渗漏,也有缝隙、裂隙型渗漏.分析结果表明,高程 240 m 以下,岩溶强度微弱,基本是一些溶孔和个别小的洞穴.特别在远离河岸的部分(离河岸 200 ~ 300 m 以外),基本未见岩体溶蚀,属于微弱渗漏或少量渗漏地带.高程 240 m 与高程 300 m 平硐间的地带,岩溶在有些区间较为发育,而在有的区间岩溶发育差,甚至见不到溶蚀,渗透性在整个平硐断面上变化大,从少量渗漏变化到严重渗漏.高程 300 m 与高程 400 m 平硐间的地带,岩溶普遍较为发育,渗透性强,属于严重渗漏地带.

在这种地区,渗漏主要是由大型溶蚀洞穴系统造成的,但中小溶蚀洞穴和溶蚀裂隙的影响也不可忽视.进行帷幕施工时,控制大型溶蚀洞穴系统是最为关键的.根据隔河岩水利枢纽的经验^[6],可以先封堵灌浆平硐中揭露出来的洞穴,实现“变岩溶化岩体为裂隙性岩体”,然后进行帷幕灌浆施工.这样既能保证完全封堵岩溶洞穴,又能降低施工难度.大型溶蚀洞穴系统封堵后帷幕灌浆的基本目的就是防止中小溶蚀洞穴和溶蚀裂隙造成的渗漏.可以考虑对不同地区区别对待,有些地带可以简化帷幕施工甚至可以不进行帷幕施工.

在现场调查过程中,得到过湖北清江水布垭工程建设公司和长江水利委员会勘测院清江地质大队有关人员的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] DREYBRODT W, ROMANOV D, GABROVSEK F. Karstification below dam sites: a model of increasing leakage from reservoirs[J]. *Environmental Geology* 2002, 42: 518—524.
- [2] STEVANOVIC Z, DRAGISIC V. An example of identifying karst groundwater flow[J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(4): 241—244.
- [3] DREYBRODT W. Dynamics of karstification: a model applied to hydraulic structures in karst terranes[J]. *Applied Hydrogeology*, 1992, (3): 20—32.
- [4] 郑玉元, 李景阳, 周丕康. 松柏山水库库首左岸岩溶渗漏及防渗处理研究[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(1): 65—71.
- [5] 邹成杰. 水库坝址岩溶渗漏类型及防渗帷幕布置形式的研讨[J]. *中国岩溶*, 1987, 6(2): 1—14.
- [6] 徐瑞春. 清江隔河岩水利枢纽工程岩溶坝基及处理[J]. *工程地质学报*, 2000, 8(增刊): 133—140.

Regularity of karst growth on the left bank of Shuibuya Dam and its permeability analysis

CHEN Xiang-jun¹, MA Feng-shan², WANG Si-jing¹, CHENG Guo-ming²

(1. *Geo-technical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China*;

2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: Based on the field investigation of grouting tunnels in the mountain on the left bank of the Shuibuya Dam, a sectional statistical analysis is performed on the areal corrosion ratio of grouting tunnels at different elevations of the curtain line section and the maximal diameter of solution caves, and the corrosion characteristics of rocks in the section of impervious curtain line are obtained. In combination with the local geological and geomorphological data, the regularity of karst growth of rocks on the left bank of the dam is found out. It is concluded that the karst growth weakens from up to down in the vertical direction, and gradually strengthens from off-shore areas to near-shore areas in the horizontal direction, and that there exist centralized growth regions, which are controlled by rock strata. Finally, a discussion is made on the permeability of the mountain, and some suggestions on optimization of the curtain grouting project are made: for large solution caves after sealing, different curtain grouting measures should be taken in different areas; in some areas, simplified curtain grouting could be adopted, or there is not any curtain construction needed.

Key words: corrosion characteristics; areal corrosion ratio; permeability analysis; Shuibuya Dam