

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201908018

桂海碑林摩崖石刻水害成因分析及防治对策

刘 硕¹, 白雪亮², 张 彬¹, 张中俭¹, 孙进忠¹, 杨文府³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 资源环境与灾害监测山西省重点实验室, 山西 晋中 030600)

摘要: 桂海碑林摩崖石刻景区为国家第五批公布的全国重点文物保护单位, 其现存的石刻具有极高的史料价值和书法艺术欣赏价值。由于长期受到地质营力的作用, 石刻出现了不同程度的水患病害, 严重威胁着文物的长期保存。本文通过现场调查将桂海碑林灰岩质摩崖石刻的水患病害归纳为渗(滴)水病害、坡面雨水冲刷病害和凝结水病害三种类型, 并分析了裂隙水、雨水和凝结水诱发石刻损坏的成因机制。为查明裂隙水的运移特征, 采用瑞雷波探测技术识别了石刻岩体内部潜在的渗流通道, 并基于瑞雷波相速度 V_R 分级对其进行了渗透性分级。基于探测结果结合石刻区的地貌特征, 提出了在崖顶区采用土工合成材料黏土衬垫(GCL)防渗铺盖和坡顶截水, 在石刻区采用裂隙注浆和表面防水封堵的综合治理对策。

关键词: 摩崖石刻; 水患病害; 成因机制; 瑞雷波探测; 防治对策

中图分类号: P642.24; P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)02-0126-08

Cause analysis and control measures of water damages in Guihai's stone inscription

LIU Shuo¹, BAI Xueliang², ZHANG Bin¹, ZHANG Zhongjian¹, SUN Jinzhong¹, YANG Wenfu³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Resources, Environment and Disaster Monitoring, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

Abstract: The scenic area of stone inscription on forest of steles in Guihai belongs to the fifth batch of major sites to be protected at the national level. The existing stone inscription there has high historical value and appreciation value of calligraphy. Due to the long-term geological force, the stone inscription there has been suffering varying degrees and different types of water damages, which seriously threaten the long-term preservation of the cultural relics. Based on the field investigation, this paper classifies the water damages in Guihai's stone inscription into three types: seepage (dripping) water damage, rainwater scouring damage and condensation water damage, analyzes the mechanism of them and confirms that limestone is the only carrier of the stone inscription. In order to find out the migration characteristic of the fissure water, this paper identifies the potential seepage channels in the rock through Rayleigh wave detection, and carries out the permeability classification of them based on the V_R classification of Rayleigh wave phase velocity. According to the results of the above analysis and detection, the comprehensive control measures of GCL seepage-proof cover and slope water interception in the cliff top area, crack grouting and surface waterproof sealing in the stone inscription area are put forward.

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41972300; 41572301; 40902086); 中央高校基本科研业务经费项目资助(2652018108)

第一作者: 刘硕(1995-), 男, 硕士, 主要从事工程地质与地质灾害防治等研究。E-mail: m18810881121@163.com

通讯作者: 张彬(1975-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程、地质灾害防治等研究。

E-mail: sc_zhb@cugb.edu.cn

Keywords: stone inscription; water damages; genetic mechanism; Rayleigh wave detection; control measures

石质文物在我国历史文化遗产中占有极其重要的地位,而水患病害是这类文物普遍面临的问题,其对文物的保护造成了十分不利的影响。针对石质文物保护中的水害问题,已有不少学者进行了研究。针对大足北山石窟的渗水病害问题,蒋思维等^[1]从物理作用、化学作用和生化作用三个方面分析了地下水对造像的危害,并提出了截断石刻顶部明水和疏导地下渗水的综合治理措施。徐利军等^[2]根据花山岩画区的水文地质与工程地质条件,分析了渗水病害的类型、危害及其形成机理,提出了防渗堵漏、建立地表排水系统、修建立壁遮挡檐等防治对策。张红梅等^[3]结合勘察资料,对大同云冈石窟的渗水病害进行了分类,分析了水的来源和水害成因,提出了一种“以疏为主,疏堵结合”的治水新思路。针对云冈石窟洞窟的凝结水病害问题,曹文炳等^[4]采用凝结水量测量装置对凝结水的形成机制和凝结水量进行了现场定量研究和测量,探讨了凝结水对砂岩风化的影响,并通过室内环境自动监测系统和除湿机有效解决了雨季在石窟岩壁上形成凝结水的问题。朱华等^[5]以龙门石窟潜溪寺作为监测点,初步分析了凝结水病害的影响因素及形成机理,通过对比分析,总结了潜溪寺凝结水变化的现状、发展直至消失的规律,提出了降低石窟内湿度和加速石窟内外空气流通的防治对策。肖碧等^[6]通过对若干石窟水害现状及成因进行总结分析,从地质工程角度提出了一些水害治理的基本原则和防治对策。从以上学者的研究中,不难发现水害已经成为危及石质文物保护的一大主要病害。

桂海碑林摩崖石刻所处的龙隐岩和龙隐洞自古即为文化游览胜地,刻石纪游,历史悠久,历代游人到此或题名题榜、或题诗题记、或摹刻名人书画,真、草、篆、隶、行诸体兼备,形成了两洞内外“摩崖殆遍,壁无完石”的碑林奇观。桂海碑林现有唐至民国时期石刻 205 处,其中唐代 1 处、宋代 104 处、元代 1 处、明代 40 处、清代 24 处、民国 3 处、年代无考 32 处,是桂林石刻最集中、最典型的地方。其 1963 年即公布为广西壮族自治区重点文物保护单位,2001 年被国务院批准为全国重点文物保护单位。桂海碑林摩崖石刻由于其所处的灰岩地层结构、复杂地下水环境和湿热多雨的气候,容易遭到裂隙渗水、坡面雨水和凝结水的侵蚀,导致石刻区出现了大面积的水患病害,对石刻的保存造成了十分不利的影响。本文在总结前人经验的基础上,针对桂海碑林摩崖石刻

出现的水患病害,先后进行了现场调查,水害成因分析,优势渗流通道探测和防治方案设计等工作,为我国水患病害下石质文物的保护提供了参考依据。

1 工程地质条件概述

1.1 地理位置及气象水文

桂海碑林摩崖石刻位于广西壮族自治区桂林市七星公园月牙山瑶光峰南麓,西临漓江支流小东江,南接龙隐路北侧(图 1)。研究区属中亚热带季风气候,气候温和,雨量充沛,四季分明且雨热同期。年平均气温为 18.8℃,年平均降水量为 1 901.3 mm,年平均蒸发量为 1 490 ~ 1 905 mm,年平均相对湿度为 73% ~ 79%。



图 1 桂海碑林摩崖石刻地理位置图

Fig. 1 Geographical location of stone inscription in Guihai

1.2 地层岩性

根据现场勘察资料,月牙山及龙隐岩、龙隐洞的地层岩性较为简单,主要为第四系残坡积土和泥盆系灰岩。残坡积土(Q^{el+dl})主要分布于月牙山山顶,呈灰黑色,湿,可塑状态,以粉黏粒为主,为灰岩风化残坡积土,局部残留较多风化岩岩屑,具有一定承载力。灰岩(D_3r)是本区石刻的唯一载体,呈灰白色,主要矿物成分为方解石,隐晶质结构,厚层状构造,石英岩脉发育,岩质坚硬。

1.3 地质构造

桂林七星景区主要由西部的月牙山和东部的普陀山组成,地质构造分褶皱和断裂两种基本类型。构造形迹发育弧形构造和新华夏系 NNE 向复合压扭性断裂,伴生裂隙有 NW-NWW 及 NE-NEE 向 2 组,近南北向的裂隙也很发育。对龙隐岩和龙隐洞石刻影响较大的断层有位于其东南侧的上月山—羊角山断层(NE 向)、其东北侧的大河断层(NW 向)和其南侧的路口断层(EW 向)。这些断裂、裂隙多是早期弧形构造

分经后期新华夏系和 NW 向构造利用、改造的产物,对形成岩溶洞穴十分有利。

龙隐岩和龙隐洞位于岩溶地区,岩体节理裂隙发育。龙隐岩岩体中发育的节理裂隙除数量较多的短小裂隙随机分布外,有 2 组优势走向,1 组节理走向 40° 左右,为剪节理,节理面平直,紧闭,透水性差;另 1 组节理走向 310° 左右,为张节理,节理面粗糙,有一定的张开度,透水性较好。岩层倾向 SSE,倾角 30° 左右。

1.4 水文地质条件

本区地下水主要有裂隙水、岩溶水和孔隙水 3 种类型,受大气降水补给。裂隙水主要分布在中低山和丘陵地带的碎屑岩地区,赋存于地表以下 $10 \sim 20$ m 的风化裂隙带中。岩溶水分布极为广泛,约占全区总面积的 90% 以上,赋存于溶洞溶隙和各种岩溶孔洞内。在覆盖地区,覆盖层多为黏土或黏土卵石等不透水层,地下水往往具有不同程度的承压现象,形成的承压水头 $1 \sim 9$ m 不等。

漓江自北而南贯穿全区,为本区地下水的最低排泄基准面和主要外排通道。地下水沿陡峻的卸荷裂隙、构造裂隙以及垂直岩溶通道产生向下的垂直径流,沿层面裂隙和水平溶洞产生向山脊线两侧方向的渗流,总的渗流方向是沿岩体裂隙网络、岩溶通道向下渗流,补给漓江的支流小东江(图 2)。



图 2 龙隐岩及龙隐洞渗流方向

Fig.2 Seepage direction of water in Longyin Rock and Longyin Cave

2 摩崖石刻水患病害及成因分析

2.1 水害调查

桂海碑林摩崖石刻位于温暖潮湿的亚热带地区,大气降水、地表水和地下水均较为丰富,根据水的运移途径,可以将水害归为渗(滴)水病害、坡面雨水冲刷病害和凝结水病害 3 种类型。通过调查,石刻区共有

题刻 205 处,主要分布在龙隐岩、龙隐洞东壁和龙隐洞西壁内侧岩壁上,洞室外侧题刻较少。目前,题刻遭水害破坏严重,总面积为 $967\,190\text{ cm}^2$,其中病害面积已达到 $153\,578\text{ cm}^2$,所有题刻均遭到不同程度的破坏。参照规范《石质文物病害分类与图示》(WW/T 0002—2007),将题刻病害程度划分为完好、轻微、严重和极严重 4 个等级(表 1)。

表 1 题刻病害程度统计表(单位:处)

区域	病害程度				调查总数	题刻总数
	完好	轻微	严重	极严重		
龙隐岩	26	56	16	7	105	107
龙隐洞东壁	16	23	17	13	69	79
龙隐洞西壁	1	9	3	3	16	19

2.2 渗(滴)水病害

裂隙渗水是石刻区题刻保护面临的主要问题,受渗(滴)水影响的题刻主要集中在龙隐岩内。溶洞内渗水的主要来源为大气降水,洞顶纵横交错的裂隙向上延伸,上部山体雨水渗流发育,导致溶洞内渗水和岩溶发展。在溶洞洞壁、洞顶,分布有多条裂隙,这些裂隙纵横交错,与层面裂隙一起构成了连通的岩体渗流网络,并在交汇点处发育渗水点。这些渗水点以滴水形式外渗,具有流速慢、持续时间长的特点。

岩石中的渗水呈弱碱性或中性,而桂林市酸雨比较严重,酸雨率近 80%。显然,降至地表的酸雨通过灰岩节理裂隙下渗后与灰岩发生了中和反应,这个过程也是灰岩溶解的过程。当裂隙渗水流经题刻时,会侵蚀题刻表面,产生溶孔和溶蚀裂隙,形成的潮湿环境又促进了苔藓植被等生物病害的滋生。另外,季节性的裂隙渗水会引起石刻岩体表面的干湿循环变化,降低岩体表层的强度和抗风化能力,加剧石刻表面的风化剥落,对摩崖石刻的保护极为不利。

2.3 坡面雨水冲刷病害

坡面雨水冲刷病害主要存在于大部分洞室外题刻区,尤以龙隐岩外侧及龙隐洞洞口的题刻最为严重。龙隐洞及龙隐岩所在山体地势陡峭,位于外侧的题刻易受雨水的直接冲刷以及大气降水形成地表径流的间接冲刷作用。当雨水流经题刻时,一方面使颜色褪色挂流,污染题刻表面,另一方面产生溶孔和溶蚀裂隙,使字迹受损。另外,频繁的降雨在形成潮湿环境滋生苔藓等生物病害的同时,又增加了题刻表面干湿循环的频率,对石刻表面破坏较为严重。

2.4 凝结水病害

在温暖潮湿的桂林地区,凝结水对题刻的影响不

容忽视。石刻区春季和夏季溶洞内湿度很大,凝结水丰富的 6~9 月,溶洞湿度都在 75% 以上,有时甚至达到过饱和。龙隐洞的两洞口相互连通,空气对流充足,该处的题刻受凝结水影响较小,而龙隐岩由于空气不流通,且光照稀少,受凝结水影响较为严重。凝结水影响范围一般集中在溶洞内距地面 0.2~1.8 m 高的范围内,一方面在洞壁上以结晶形式保留其运动轨迹,使洞壁留下明显的不规则片状或条状白色沉淀痕迹,对题刻表面造成污染,另一方面在适当光照条件下滋生微生物苔藓病害,加速石刻表面的风化剥蚀。

3 优势渗流通道探测

3.1 探测原理

瑞雷波在不均匀介质中传播有一个重要的特性——频散,波长 λ 、波速 ν 和频率 f 之间如下关系: $\lambda = \nu/f$,理论分析表明,瑞雷波的有效探测深度 Z 与其波长成正比,即: $Z = \beta \times \lambda$ (β 为与岩土体泊松比有关的系数)^[7-8]。层状介质瑞雷波频散曲线的正演分析表明,曲线的高频部分与浅层介质相对应,曲线的低频部分与深层介质相对应,曲线的拐点与不同介质的分层界面相对应。这为利用瑞雷波探测地下岩土体弹性波速的空间分布提供了可能^[9]。

3.2 多道瞬态瑞雷波探测

采用多道瞬态瑞雷波探测技术对石刻区渗流通道进行探测,根据现场实际条件和探测目的,在月牙山上布置 3 条测线,编号分别为测线 1、测线 2 和测线 3,在

各条测线上的转折部位设置一系列测线控制点控制测线的转向,3 条测线总计布置检波器排列 23 个(图 3)。

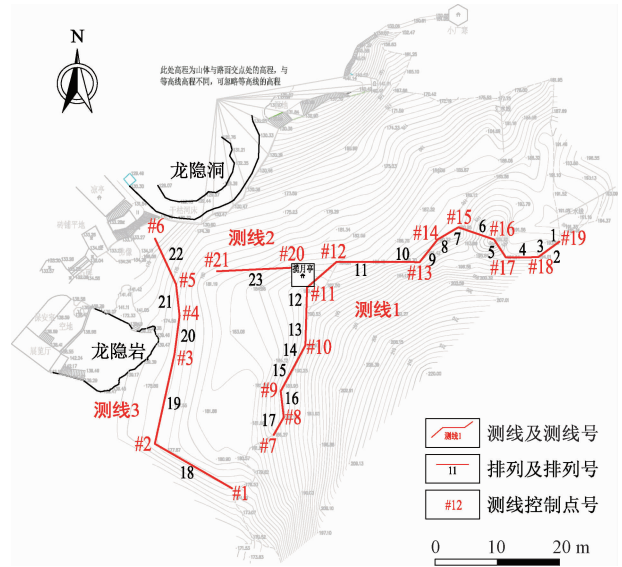


图 3 月牙山景区瑞雷波探测测线布置示意图
Fig. 3 Layout of Rayleigh wave detection line in Crescent Hill scenic area

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[10]中不同类型岩土介质所对应的剪切波速范围,考虑到岩土介质的弹性波速与岩土体的软弱程度和完整性呈正相关,且其瑞雷波波速 V_R 与剪切波速 V_s 近似相等的关系 ($V_R \approx 0.95 V_s$),可以得到月牙山岩土体瑞雷波相速度 V_R 分级与岩土体性状对照表(表 2)。

表 2 月牙山岩土体瑞雷波相速度 V_R 分级与岩土体性状对照
Table 2 Comparison table of V_R and rock-soil properties in Crescent Hill

$V_R/(m \cdot s^{-1})$	≤ 800	800 ~ 1 600	1 600 ~ 2 400	2 400 ~ 3 200	$\geq 3 200$
岩土体性状	覆盖土层、断层破碎带、强风化岩体,节理裂隙发育并受到较显著的溶蚀作用,可构成良好的导水渗水通道。	中风化岩体,节理裂隙发育,张节理的渗水能力较好,岩体整体渗透性能一般。	弱风化岩体,节理裂隙所受到的溶蚀作用轻微,张性节理有一定的渗水能力,岩体整体渗透性较差。	微风化和未风化岩体,坚硬完整,节理裂隙基本闭合,岩体整体渗水能力微弱。	

联合各排列所提取的瑞雷波相速度—深度数据,并对 3 条测线分别进行瑞雷波相速度—深度成像(图 4)。由测线 1 成像剖面可见,最大规模的低速带出现在测线控制点#11~#13 之间,反映了月牙山岩体与龙隐岩岩体间大规模断裂破碎带。此外,测线控制点#7~#11 之间、#13~#15 之间、#18~#19 之间的测线走向为 NNE、NE 或 NNW,基本上都与岩体中发育的张性节理走向(310°左右)近正交,控制点#15~#18 之间的测线走向为 NW~NNW,大体与剪节理的走向正交,前者对应的剖面中强风化岩体所占的比例显著

高于后者对应的剖面中强风化岩体所占比例,与张性节理更容易遭受溶蚀风化的事实相符。在上述以构造结构面控制的岩体差异溶蚀作用下,形成了一系列透水性良好的强烈溶蚀带,成为上部水体入渗的渗流通道,即瑞雷波相速度—深度剖面中编号为#1~#11 的渗流通道。

3.3 渗透性分级

根据山体瑞雷波相速度—深度剖面揭示的渗流通道分布情况及其溶蚀风化程度和对应的渗透能力,将其渗透性划分为“好(H)”、“中(M)”和“差(L)”3 个

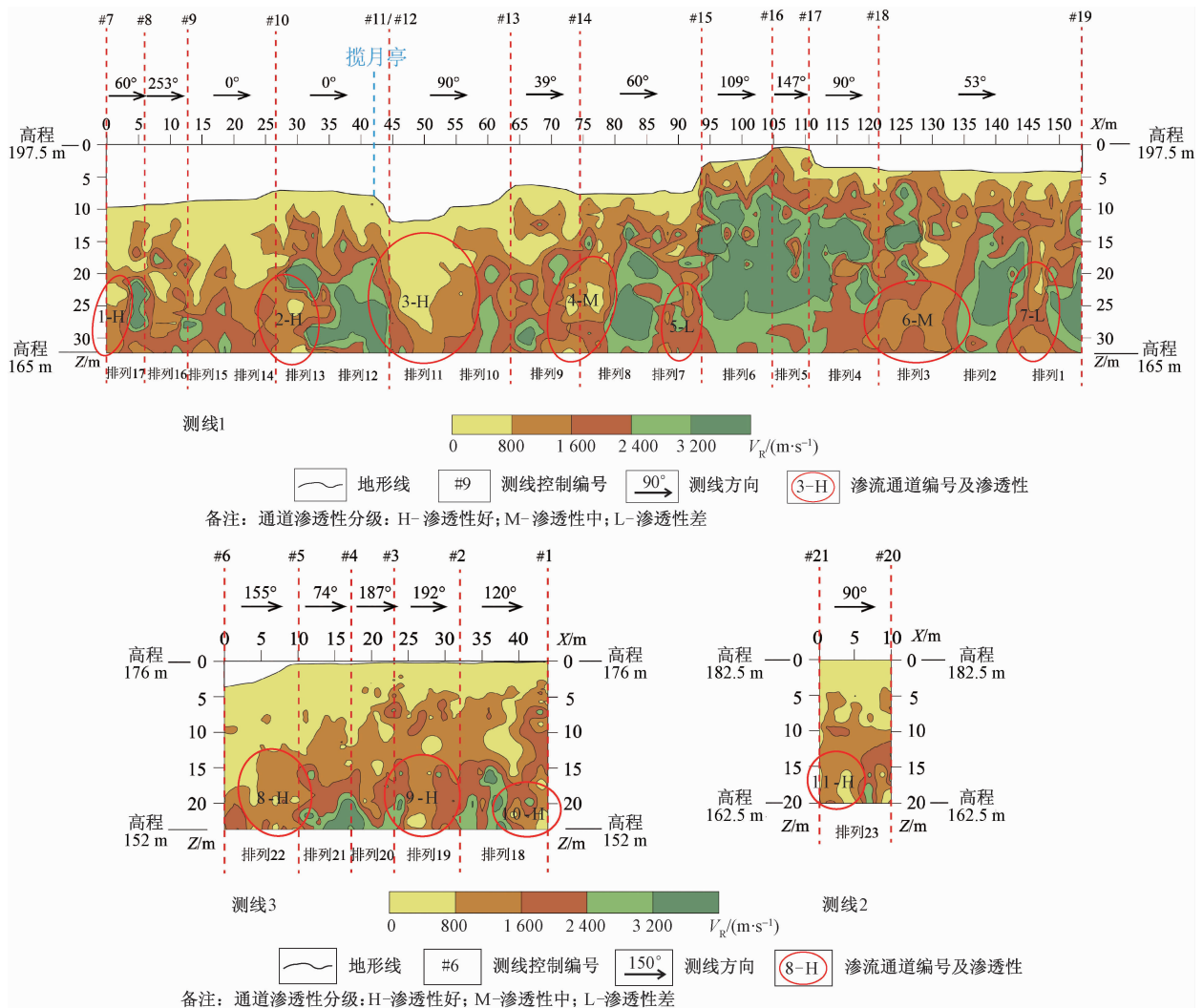


图4 月牙山瑞雷波相速度—深度成像剖面

Fig. 4 Crescent Hill Rayleigh wave velocity-depth imaging profile

H—渗透性好; M—渗透性中; L—渗透性差

等级,并分别与《石质文物保护工程勘察规范》(WW/T 0063—2015)^[11]中的“涓流”、“滴水”和“渗析”相对应(表4)。由此得出,编号为1,2,3,8,9,10,11的渗流通道渗透性为“好(H)”,编号为4,6的渗流通道渗透性为“中(M)”,编号为5,7的渗流通道渗透性为“差(L)”。

测线2的成像剖面中与排列19对应的渗流通道9距龙隐岩最近,渗透性能良好,且与由张性节理控制的差异溶蚀作用有关,与龙隐岩有直接的水力联系,对龙隐岩题刻的威胁最大;排列22附近的渗流通道8,位于龙隐岩和龙隐洞之间,渗透性能良好,但这一位置上的张性节理走向(NW)不会指向龙隐岩和龙隐洞,渗流通道的水体可能通过走向NE的剪节理或岩层面与旁侧的张节理建立较弱的水力联系,进而对龙隐岩或龙隐洞产生不利影响,考虑到沿岩层面(倾向SSE)

的渗流向主要为SSE,因此,渗流通道8对龙隐岩的影响比对龙隐洞的影响更大一些。

测线1的成像剖面中排列17附近的渗流通道1和排列13附近的渗流通道2是由张性节理控制的差异溶蚀形成的渗流通道,从张性构造节理发育的走向看,这两个通道很可能与测线2成像剖面中的通道9和通道8连通,因此,这两个渗流通道对龙隐岩题刻的威胁较大。

测线3的成像剖面中排列23附近的渗流通道11距龙隐岩较近,渗透性能良好,且与由张性节理控制的差异溶蚀作用有关,与龙隐岩有直接的水力联系,对龙隐岩题刻的威胁较大。此外,在三条测线中,规模最大的渗流通道是在测线1成像剖面中控制点#11~#13之间的3号渗流通道,它构成了龙隐岩、龙隐洞山体的

一个重要水文地质边界。

综上所述,编号为 1,2,3,8,9,11 的渗流通道渗透

性为“好”,且对龙隐岩的威胁较大,属于裂隙注浆方案制定时应该重点考虑的优势渗流通道。

表 4 渗流通道的瑞雷波相速度成像特征渗透性分级

Table 4 Permeability classification of Rayleigh wave phase velocity imaging characteristics in seepage channels			
渗流通道渗透性分级	好	中	差
渗透性分级代号	H	M	L
渗水类型	涓流	滴水	渗析
渗水特征	出水点处以小股流水形式渗出	出水点处以水滴形式渗出	水渗出量很小,仅在出水点周围形成潮湿环境
瑞雷波相速度成像特征	由 $V_R < 1\ 600\ \text{m/s}$ 的强风化岩体、 $V_R < 800\ \text{m/s}$ 的溶蚀裂隙构成,甚至有溶洞存在	以 $V_R < 1\ 600\ \text{m/s}$ 的强风化岩体、 $V_R < 800\ \text{m/s}$ 的溶蚀裂隙为主,存在一定量 $V_R = 1\ 600 \sim 2\ 400\ \text{m/s}$ 的中风化岩体,形成一定厚度的弱透水体	以 $1\ 600\ \text{m/s} < V_R < 2\ 400\ \text{m/s}$ 的中风化岩体为主,对渗流形成较强的阻隔作用,不存在 $V_R < 800\ \text{m/s}$ 的溶蚀裂隙带

4 工程防治对策

4.1 崖顶 GCL 防渗铺盖

GCL(土工合成材料黏土衬垫)是一种新型防渗铺盖材料,具有安全环保、体积小、重量轻、施工简便、柔性好、抗剪强度和抗拉强度高优点,可以较好地适应不均匀沉降^[12-13]。施工时采用人工铺设的方式,铺设之前先清基、平整,然后依据崖顶实际地形,按一定顺序和方向进行铺设,下层铺好后,再铺设上一层,上下层的搭接长度为 400 mm,搭接处膨润土浆刷 500 mm,膨润土浆配比为 1:6,搭接缝处膨润土耗量约为 0.4 kg/m。铺设完成后,检查铺设有无问题,若无问题,及时覆盖填土,在填土表面种植草坪。

4.2 坡面截水

在山顶人行通道和龙隐岩崖顶位置各砌筑一条截水沟,截水沟采用毛条石和 M7.5 水泥砂浆结合山顶实际地形砌筑,排水坡度不小于 1%,每隔 10 ~ 15 m 设置一道宽 2 cm 的伸缩缝,用沥青麻筋填塞。对排水沟揭露的各类裂隙,灌注水泥浆液封堵^[14]。同时对现有的条石排水沟进行检查,采用防水砂浆对排水沟内侧做勾缝防水处理,清理排水沟内的杂物,保证排水通畅。

4.3 裂隙注浆

经过现场勘察,在龙隐岩内共发现 9 处主要渗水点,对 9 处渗水点附近的裂隙及龙隐岩岩壁上的 4 条较大裂隙进行注浆处理,注浆位置如图 5 所示。浆液采用超细水泥,水灰比为 0.6 ~ 0.65(重量比),注浆压力为 0.1 ~ 0.4 MPa。施工设备主要有 Hx—4800 注浆机、3 m³ 空气压缩机、风枪、电锤、浆材搅拌机等。

施工工艺按先后顺序依次为钻孔、插管、洗孔、封缝、表面防护、压力注浆、拔管做旧和现场清洗。钻孔方向与裂隙走向一致,钻孔间隔为 200 ~ 350 mm,深度为 350 ~ 500 mm,由于部分裂隙有碳酸钙沉淀物充填

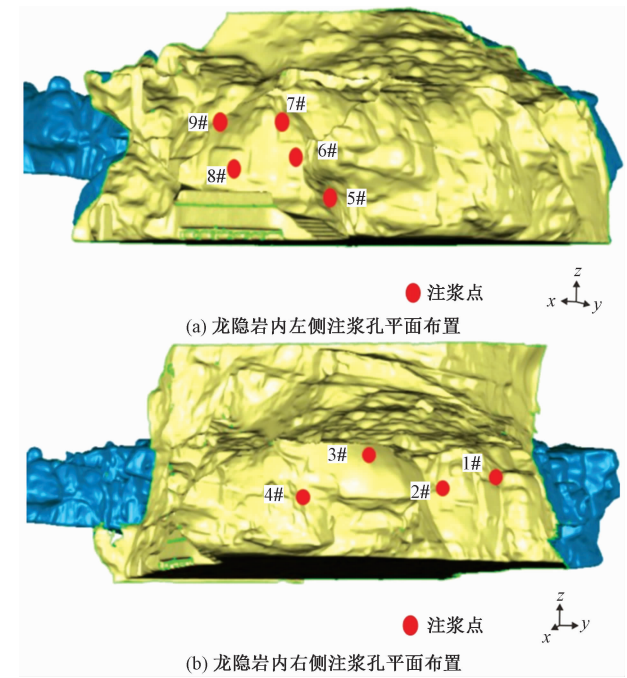


图 5 龙隐岩内注浆孔平面布置图
Fig. 5 Plane layout of grouting holes on Longyin Rock

层,钻孔时应穿透碳酸钙沉淀物充填层。对于龙隐岩岩壁上的较大裂隙,可直接插注浆管进行注浆,注浆间隔为 5 ~ 7 m。插管时,将外径 13 mm、内径 5 mm 的硬质塑料管缓慢插入钻孔内,分 2 段进行洗孔,每次洗孔深度为钻孔深度的一半,洗完 1 h 后使用添加速凝剂的超细水泥对钻孔周围裂隙进行封缝。注浆前,为防止浆液渗漏污染题刻表面,采用塑料薄膜对注浆孔周围 1 m² 范围内的区域进行保护,用塑料布对注浆区域内的地面进行覆盖,并检查裂缝封缝效果。注浆时,依据设计压力进行注浆,从下至上,先注稀浆,再注浓浆,稍有渗漏先兆,应立即停止,迅速用棉纱蘸水进行清洗。待浆液完全凝固后,切取伸出岩面的塑料注浆管,使用砂浆封口,采用超细水泥加灰岩岩粉在封闭裂隙

的表面上进行做旧处理,使之与壁面保持在同一平面。注浆完成后,对施工现场进行清洗处理^[15-18]。

4.4 表面防水封护

根据实验室内的对比试验结果,封护材料选用丙烯酸酯溶液和有机硅类的封护剂 WD-10 按 5:1 的比例进行配制^[19-20]。在封护之前,先用手术刀将石刻表面的苔藓、地衣与泥土清除掉,再用清水清洗晾干,然后将配制好的封护材料均匀涂抹于石刻表面形成隔水层。

5 结论

(1) 石刻区的水患病害按水的运移途径不同可分为渗(滴)水病害、坡面雨水冲刷病害和凝结水病害三种类型,其中渗(滴)水病害对题刻的危害最为严重。

(2) 裂隙水、雨水和凝结水在直接侵蚀题刻表面的同时,会引起题刻表面的干湿循环变化,滋生苔藓等生物病害,加速题刻表面的风化剥落。

(3) 在多道瞬态瑞雷波成像剖面中,编号为 1,2,3,8,9,11 的渗流通道渗透性为“好”,且对龙隐岩的威胁较大,属于裂隙注浆方案制定时应该重点考虑的优势渗流通道。

(4) 采用分区设计的思路,提出了在崖顶区采用 GCL 防渗铺盖和顶面截水,在石刻区采用裂隙注浆和表面防水封护的综合治理对策。

参考文献 (References):

- [1] 蒋思维, 谢本立. 大足北山石窟的水害和治理[J]. 工程勘察, 1995, 23(6): 34-36. [JIANG S W, XIE B L. Water damages and control in Beishan Grottoes at Dazu [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995, 23(6): 34-36. (in Chinese)]
- [2] 徐利军, 方云, 王金华, 等. 花山岩画渗水病害机理及环境治理对策[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(2): 24-26. [XU L J, FANG Y, WANG J H, et al. Research on the water permeation disease and environmental cure of Huashan rock art [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(2): 24-26. (in Chinese)]
- [3] 张红梅, 马国栋, 速宝玉. 大同云岗石窟文物渗水病害防治方案探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(5): 64-67. [ZHANG H M, MA G D, SU B Y. A discussion of the treatment of water-seepage disease of the stone carvings in the Yungang Grotto near Datong [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(5): 64-67. (in Chinese)]
- [4] 曹文炳. 云冈石窟洞窟内凝结水形成机制与防治

研究[C]//2005 年云冈国际学术研讨会论文集(保护卷), 2005: 8. [CAO W B. Study on the formation mechanism and prevention of water condensation in Yungang Grottoes [C]//The 2005 Yungang International Symposium Proceedings (Protection Volume), 2005: 8. (in Chinese)]

- [5] 朱华, 杨刚亮, 方云, 等. 龙门石窟潜溪寺凝结水病害形成机理及防治对策研究[J]. 中原文物, 2008(04): 109-112. [ZHU H, YANG G L, FANG Y, et al. Study on the formation mechanism and control measures of condensate disease in Qianxi Temple of Longmen Grottoes [J]. Cultural Relics of Central China, 2008(04): 109-112. (in Chinese)]
- [6] 肖碧, 王逢睿, 李传珠. 石窟水害成因的工程地质分析与防治对策[C]//岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 武汉, 2010: 332-337. [XIAO B, WANG F R, LI C Z. Engineering geological analysis of water disaster causes on grottos and its countermeasures [C]//Innovation and Practice of Rock Mechanics and Engineering: The 11th National Symposium on Rock Mechanics and Engineering. Wuhan, 2010: 332-337. (in Chinese)]
- [7] 刘磊, 周富彪, 孙进忠, 等. 考虑道间时差相位的多道瞬态瑞雷波探测方法[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 331-341. [LIU L, ZHOU F B, SUN J Z, et al. Multichannel method of transient Rayleigh wave detection in consideration of arrive time difference phase between channels [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 331-341. (in Chinese)]
- [8] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [China Academy of Building Research. Code for seismic design of building: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)]
- [9] 国家文物局. 石质文物保护工程勘察规范: WW/T 0063—2015 [S]. 北京: 文物出版社, 2015. [National Cultural Heritage Administration. Code for investigation of stone cultural relics protection engineering: WW/T 0063—2015 [S]. Beijing: Heritage Press, 2015. (in Chinese)]
- [10] 何俊, 夏彩虹, 胡景山. GCL 与 CCL 复合衬垫的等效性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 102-106. [HE J, XIA C H, HU J S. Equivalence analysis of GCL and CCL composite liner [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 102-106. (in Chinese)]
- [11] 董兴玲, 王宝. 试验条件对 GCL 渗透系数测定结果的

- 影响[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 153 – 158. [DONG X L, WANG B. Effects of testing conditions on the hydraulic conductivity of the geosynthetic clay liner[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 153 – 158. (in Chinese)]
- [12] 冯楠. 潮湿环境下砖石类文物风化机理与保护方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. FENG N. Study on deterioration mechanism and the conservation of typical brick and stone cultural heritage in moisture circumstances [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [13] 马朝龙, 方云, 李建厚, 等. 龙门石窟万佛洞至奉先寺北段渗漏水成因分析及综合防治措施研究[J]. 敦煌研究, 2007(5): 36 – 38. [MA C L, FANG Y, LI J H, et al. Cause analysis and comprehensive prevention and control measures of leakage water from Wanfo Cave to the north section of Fengxian Temple in Longmen Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2007, (5): 36 – 38. (in Chinese)]
- [14] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69 – 73. [RUAN W J. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69 – 73. (in Chinese)]
- [15] 王志荣, 李铁强, 陈玲霞. 注浆封堵断裂构造的施工参数确定方法[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 113 – 115. [WANG Z R, LI T Q, CHEN L X. Determination of construction parameters for the blockage of faults by grouting[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 113 – 115. (in Chinese)]
- [16] 刘祥友, 翟国林, 方云, 等. 龙门石窟岩体裂隙防渗注浆机制及参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3941 – 3947. [LIU X Y, ZHAI G L, FANG Y, et al. Impermeable grouting mechanism and parameter analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3941 – 3947. (in Chinese)]
- [17] 虎维岳, 吕汉江. 饱水岩溶裂隙岩体注浆改造关键参数的确定方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 596 – 601. [HU W Y, LYU H J. Determination method of key parameters of grouting in water saturated Karst-fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 596 – 601. (in Chinese)]
- [18] 杨善龙, 王旭东, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟崖体中水分分布初步分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 94 – 97. [YANG S L, WANG X D, GUO Q L, et al. Preliminary analysis of moisture distribution in cliff rocks of the Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 94 – 97. (in Chinese)]
- [19] 张志耕, 闫澍旺, 崔激. 瑞雷面波法在路基质量检测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 117 – 119. [ZHANG Z G, YAN S W, CUI W. Application of Rayleigh wave method in inspection of roadbed disease [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 117 – 119. (in Chinese)]
- [20] ZHANG H, LIU Q, LIU T, et al. The preservation damage of hydrophobic polymer coating materials in conservation of stone relics[J]. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(7/8): 1127 – 1134.

编辑: 张明霞