

文章编号: 0451-0712(2005)12-0203-05

中图分类号: U458

文献标识码: B

公路隧道健康研究现状与趋势

陈洪凯^{1,2}, 李明¹

(1. 重庆交通学院岩土工程研究所 重庆市 400047;

2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重庆实验室 重庆市 400044)

摘要: 公路隧道健康问题是困扰我国公路交通建设的一个重大问题。本文就公路隧道中常见的撞击回波法、地质雷达、激光扫描等无损健康检测技术的原理与应用进行概述;对常见的 7 种公路隧道病害成因与相应的防治技术做了归纳总结;探讨了隧道健康研究的几个主要方向。

关键词: 公路隧道; 病害; 健康; 诊断; 控制

近几年来,随着国家加强对基础设施建设的投入,我国交通建设事业取得了迅猛发展,我国公路隧道特别是长大隧道建设与科研都取得了长足的进步与发展。目前,我国已经成为世界上隧道工程数量最多、最复杂、发展最快的国家。中国公路网正在向西部延伸,将使中国西部成为世界公路界关注的焦点,中国西部特殊的地域条件决定了公路隧道建设也将进入一个新的发展时期,一大批特长隧道将逐步开工建设,将把我国修建公路隧道的技术水平推向一个新的高度。

但是,我国地域自然条件差异较大,公路隧道穿越的山体工程地质及水文地质等条件复杂多变,既有隧道又受修建时期的设计与施工技术条件的限制,早期修建的隧道经常出现隧道拱顶开裂、边墙开裂、拱顶空洞、衬砌损坏、隧道渗漏水、隧道冻害、围岩大变形、衬砌厚度薄、混凝土强度低、隧道内空气污染等病害;另外,由于各方面的原因,隧道内部的照明设施不足等引发交通事故,也是可能引发灾难性火灾事故的隐患所在。因此,公路隧道的健康问题变得日益突出,我国目前 20%~30% 的公路隧道处于病害发育的亚健康状态,如何对现役营运隧道或新建隧道进行健康诊断和病害与灾害预防和控制就显得极为重要。国内多数学者在这方面做了较多研究^[1~6]。

1 公路隧道健康检测方法

对于公路隧道健康的检测,最初的检测手段多是根据肉眼观察进行判断,受人为因素影响较大,存在着效率低,准确性差的问题。为了探询隧道内部病害的真正原因,采用了钻孔方法,钻孔检测虽直观,但检测速度慢,风枪成孔垂直度较难控制,且探杆感觉、卷尺量测受人为因素影响较大,同时破坏隧道排水系统,影响隧道寿命,检测结果代表性差,难以全面反映隧道整体及各部位质量。根据国外的经验和实践,对隧道进行无损伤探测手段(包括非接触式扫描探伤设备和其他物探手段等)的开发被提上日程。先后出现了运用声学、光学、机械振动技术、射线技术、电子和电气技术等检测技术^[7],见表 1。

其中,撞击回波法、地质雷达和激光扫描技术应用价值最大。

撞击回波法是用钢球产生的超声波和音速范围内的机械应力脉冲检测结构。用传感器记录观察到的多次反射波,并进行频率分析。该方法检测速度较快,但是检测深度依赖于要检测的材料结构、强度以及应力脉冲的频带,尺寸效应显著,球的尺寸要适合给定的检测状态。

地质雷达是一种利用高频脉冲电磁波探测混凝土及下覆介质分布形态的一种无损物探检测方法。使用的是高频电磁波,电磁波在介质中传播时,因介质

表 1 隧道无损检测各种技术的优缺点

检测技术		用 途	隧道中应 用价值	存在问题	优 点
机械振 动技术	结构动力学法(直接振动)	桥梁、地面建筑物	很低	墙厚不均匀、岩层不均质、 地下水位变化	没有
	地震波反射法	地质勘测、确定岩层厚度	低	准确度、速度	仅在隧道衬砌背后有 很大的空穴连通时
	微地震波法和声 波传播分析法	煤矿、实验室试验	很低	复验性、准确度	对有干扰的 结构检测
	超声波法—反射和间接表 面传播法	钢结构、机械、地下管道、贮库	很低	对非均质地层及混凝土连接的测试、 骨料的渗出速度、准确度	没有
射线技术	γ射线反向散射	道路结构、地面结构、 湿度和密度检测	很低	速度、穿透深度	没有
	中子反向散射		低	速度、穿透深度	没有
电气和电 子技术	涡流法(杂散电流法)	导电金属、管道裂缝探测、 检查钢筋	低	速度、非导电材料、穿透深度	检查钢筋
	地质雷达	桥梁或隧道的地层检测	高	数据整理、金属外罩反射、速度	优良的穿透深度
	电势法	探查钢筋腐蚀	低	速度、穿透深度	探查腐蚀
光学技术	红外线温度记录法与 直观检测并用	隔热检查、隧道	很高	隧道环境(气候)、数据整理、 设备散热	探查空洞和局部潮湿 与裂缝等、高速
	多光谱分析	古迹、建筑物、隧道	高	速度、振动、需要大功率照明设备、 数据整理、穿透深度	探查细微而干燥 的裂缝

介电常数变化或介质几何形状变化而产生相位及回波能量、波形的变化,由计算机将收到不同的波阻抗界面产生的数字信号进行成像处理和分析计算,从而推断地下地质结构。该检测技术采用了先进的连续透视扫描无损探伤技术,探测精度比传统检测方法高,且又是连续扫描,可获得隧道探测的连续结果。这种检测手段目前在国内外得到了广泛应用,并取得了重要成果^[5,8~12]。

激光扫描是近几年首先在欧洲发展起来的新型检测技术,由于其扫描速度快、测量精度高(可达0.2~0.3 mm)、获得三维空间数据的同时获得三维图像等优点,在德国、瑞士等国家普遍应用^[13]。图1是隧道扫描仪的作用原理。安装在水平轴线的激光器以极高的速度旋转,并测量表面反射。这样可以得到隧道内壳表面高分辨图,以此评价表面的裂缝、剥落和其他可看得见的异常现象。除了可视照片外,还能拍摄表面的红外图。只要有足够的温度梯度,这两种图都可以说明湿块、空腔和内壳后的水。隧道扫描仪的优点归纳如下:(1)对交通没有或只有轻微负面影响;(2)能以数字形式按比例绘制全部面积的内壳表面;(3)同步多路记录(可视照片+红外图);(4)测量能够重现;(5)重复测量能够获得有关损伤发展的

数据。目前流行的3D 激光扫描仪主要根据以下3种原理设计:(1)Triangulation;(2)Pulse-based;(3)phase-based。不同应用领域需要选择相应的3D 技术,才能有效利用。

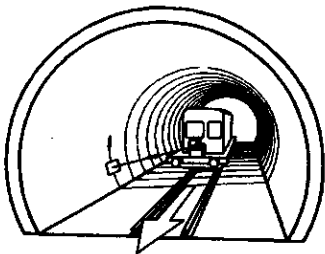


图 1 隧道扫描仪的作用原理

近几年来在隧道地质病害诊治中应用地震CT技术,并取得了一定的进展^[14,15]。另外还有声波检测法^[16]、应力应变法^[17]等也在隧道检测中采用。

2 公路隧道病害研究

影响隧道健康的病害种类很多,成因较为复杂,理论研究目前尚有一定的困难,但是,理论和机理研究是隧道病害防治的基础。目前,对几种主要隧道病害的认识理论见表2。

表 2 隧道病害成因分析

病害或灾害	成 因 分 析
水害	初步认为是在隧道修建过程中,破坏了原始围岩体的水系平衡,隧道成为所穿过山体附近地下水汇集的通道,当隧道围岩与含水地层连通,而衬砌的防水与排水设施、方法不完善或隧道防排水设施老化时,隧道水害就必然发生了。
衬砌裂损	除了隧道衬砌在设计、施工方面的原因以外,由于隧道工程处于复杂的围岩地质体中,受到变形压力、松动压力作用、地层沿隧道纵向分布及力学性态的不均匀作用、温度和收缩应力的作用、膨胀围岩压力或冻胀性压力作用、腐蚀性介质作用、运营车辆的循环荷载作用等,使隧道衬砌结构物产生裂缝和变形,进而导致隧道更大灾害隐患的发生。
冻害	在寒冷地区的隧道,除了在设计、施工方面的原因以外,主要受寒冷气温的作用和季节冻结圈的作用,另外与隧道围岩的岩性有关,如果围岩是非冻胀性土,则发生这种病害的可能性较小。
衬砌腐蚀	主要受衬砌圬工的质量和水泥的品种,渗流到衬砌内部的环境水含侵蚀性介质的种类和浓度,环境的温度和湿度等自然条件的影响。
震害	由地震引起的隧道灾害,根据震级的不同,灾害程度有所不同。
通风不良	当隧道内的有害气体积聚到一定程度后,得不到有效稀释和疏散时,将会引起严重的影响。
火灾	由于隧道内通道狭窄,照明状况不良而发生车祸,车上易燃易爆物品(特别是油罐车)燃烧发生火灾,或者是隧道条件较差,某些易燃气体或电缆、电器短路引发火灾,另外还有人为地纵火或恐怖分子袭击造成的火灾。

公路隧道病害的根源,主要包括支护系统强度不足和水害。对病害进行整治涉及病害原因、材料、工艺、方法诸多方面。目前传统做法普遍存在缺乏系统理论指导,有一定的盲目性,易造成人、财、物浪费、阻碍交通、减小隧道有效断面等,因为公路隧道病害整治的施工条件是在有限的时间、空间中进行的。公路隧道灾害主要是隧道火灾、隧道空气质量超标、通风照明设施不合理,造成车祸等。对于以上的病害与灾害,只有采取切实有效的控制方式、方法,才能够保证公路隧道健康、安全运营,收到良好的经济、社会效益。

3 公路隧道健康控制技术

公路隧道病害防治与控制的指导性原则是“预防为主”、“早期发现”、“及时维护”和“对症下药”。随着对隧道病害产生后果、病害机理认识的深化以及对环保和运营舒适度要求的提高,人们对隧道病害控制的认识日趋科学合理。

公路隧道病害与灾害控制技术,在近十几年来进步很快,特别是在北欧、日本和美国等,控制设计和施工趋于规范化,新材料,新工艺不断涌现,相对来讲,关于这方面的防治与控制理论尚待进一步深化。公路隧道病害与灾害控制技术见表 3。

表 3 公路隧道病害与灾害控制技术

病害或灾害	防 治 手 段
水害	1 适当疏导(排水管、排水槽、排水沟,增设或疏通平行导洞等);2 注浆堵水(包括衬砌背后和内部注浆、隧道基底注浆);3 增设内防水层(涂刷、刮压、喷涂)。
衬砌裂损	1 表面清扫、凿除、嵌缝及开裂压浆;2 衬砌补强(防护板、钢板、金属网、喷层、现灌混凝土、补强钢拱架等);3 稳定底板(底板压浆、补修仰拱等);4 局部改建与改建(撤换局部衬砌、改建隧道、扩大建筑面积,重新修筑)。
冻害	1 综合治水;2 更换或改造土壤;3 保温防冻;4 结构加强;5 防止融坍。
衬砌腐蚀	1 采用耐侵蚀混凝土,提高衬砌的密实性,掺加外加剂;2 采用耐腐蚀防水材料做隔离防水层;3 向衬砌背后压注防腐蚀浆液;4 加强排水措施,隔绝腐蚀通道;5 补强衬砌。
震害	1 提高衬砌设计抗震等级,提高柔性;2 加固已有隧道;3 补强隧道衬砌。
通风不良	1 提高车辆通行隧道的速度;2 加强机械通风能力;3 避车洞处安装防烟门;4 提高隧道衬砌的抗渗和抗泄漏能力。
火灾	1 隧道建筑自身防火(设计、建材选用);2 运营防火(建立检测报警系统、配置灭火器材、建立消防梯队);3 控制隧道通风;4 补强隧道衬砌;5 撤换衬砌或改建隧道。

(1) 隧道水害。

关于水害的整治对策,过去有许多方法,但是施工后很短时间内,又发生降低隧道功能的漏水和结冰的情况很常见。因此,在考虑对策的可行性、效果、经济性以外,还要考虑耐久性。关宝树^[2]根据隧道渗漏水的状况,分为线状漏水和面状漏水两类,对各种治水方法做了较为全面的总结,主要有导水法、止水法、背后压浆法和降低水位法等。具体的分类见图2。在具体的施作过程中,根据实际情况选用适当的方法和材料^[2,18~20]。

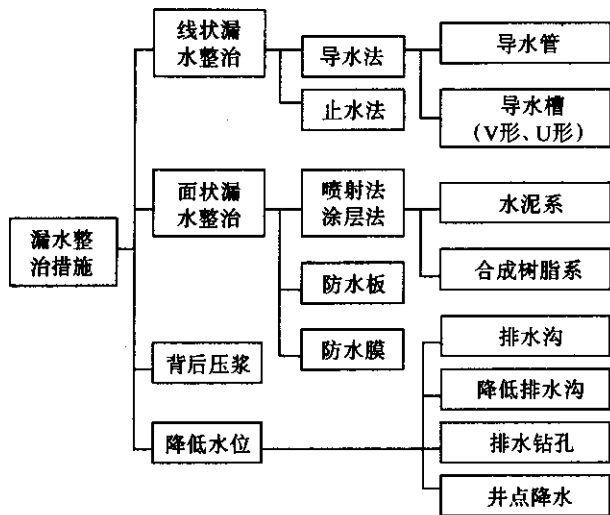


图2 整治漏水对策的分类

(2) 衬砌裂损。

一般情况下,隧道裂损与隧道渗漏水是伴生的,在治理隧道衬砌裂损时,与水害、冻融和腐蚀一起进行综合治理,往往能够取得令人满意的效果。采用的主要措施有:对衬砌表面清扫、凿除、嵌缝及开裂压浆,用防护板或钢板对隧道衬砌进行局部加固,采用金属网等防治隧道剥落,采用钢拱架、喷层或现灌混凝土补强隧道衬砌,在裂损比较严重地段,撤换衬砌,甚至局部改建或重新修建等。以上各种工法在日本、北欧和我国的铁路与公路隧道的病害整治过程中普遍应用,取得了令人满意的效果。

(3) 隧道冻害^[21~23]。

严寒及寒冷地区隧道冻害的防治,其基本措施是综合治水、更换土壤、保温防冻、结构加强、防止融坍等,可根据实际情况综合运用。从热能方面进行分类,见图3所示,将其分为隔热法和加热法,目前主要采用隔热法,加热法正在试验之中^[2]。

(4) 衬砌腐蚀。

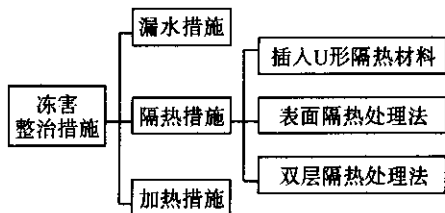


图3 冻害整治措施分类

根据隧道腐蚀产生的原因和条件,采取的整治措施主要是采用与侵蚀性环境水不起化学作用的防腐浆液压注混凝土衬砌背后,割断腐蚀途径;另一方面是加强排水,必要时补强衬砌。

(5) 隧道震害。

对于隧道震害采取的主要措施是补强隧道衬砌和撤换隧道衬砌。

(6) 隧道通风不良。

解决隧道内有害气体对养护维修人员、车辆司乘人员和行人的危害,减少对各种设备的腐蚀,是隧道内通风不良处理的主要问题,经过多年的实践和经验,解决这一问题的途径有:提高车辆通过隧道的速度、加强隧道内机械通风能力、避车洞处安装防烟门、工作人员配备防毒器具、提高隧道衬砌的抗渗和抗泄漏能力(主要指瓦斯、 CH_4 等)等。

(7) 隧道火灾。

对于隧道灾害的治理主要在于防火,例如在隧道设计时,在条件允许的条件下,修建上、下行分离的单独式隧道、衬砌采用防火材料或至少在隧道衬砌表面涂防火材料、建立隧道火灾预防预报系统、隧道内配备完善的灭火装置和消防梯队建立完善等。在隧道发生火灾时,采取的主要措施有:控制隧道内通风风速,火灾最近人员进行积极自救,有效利用消防队伍,针对火灾后的实际情况,采取隧道衬砌补强措施,补强的技术手段与隧道衬砌裂损情况相同^[24]。

当隧道穿越特殊地质地段时,将会产生另外的一些病害,例如膨胀压力作用下产生的大变形、在岩溶地区产生涌突水、瓦斯煤气地层产生有害气体泄漏等^[25~28],针对这些病害,需要采取特殊的加固、补强、改良地层等措施。

公路隧道病害的产生与多种因素有关,往往是一种或多种病害同时出现,尤其是隧道内水害与隧道衬砌裂损和其他病害的关系密切,对隧道病害的整治往往也不是一种或两种措施就能够凑效,而是多种治理手段综合的结果,并且与隧道健康检测手

段和判断准确性与否密切相关。

4 研究趋势分析

基于前述可见,目前在公路隧道健康方面的研究,侧重于隧道病害,且基本采取唯象的研究方法,病害机理研究较少,处理方法探讨较多,研究成果始终停留在较低的科学层面,这可能是目前公路隧道病害日益发育的根本原因。鉴于此,公路隧道健康问题研究应遵循下述原则或思路。

(1)将公路病害现象上升到公路隧道健康理念,公路隧道线形、结构形式与材料、隧道围岩等构成隧道健康的有机系统,采用系统论、多学科耦合方法实施公路隧道健康研究。

(2)高度重视公路隧道健康诊断机理研究,宏观和微观结合,建立健康智能频谱,构建公路隧道健康智能诊断机理。

(3)遴选并量化公路隧道健康评价指标,集成公路隧道健康评价系统,区分公路隧道的整体健康状态及局部健康状态,量化局部健康向整体健康的转化关系。

(4)运用3D 激光扫描技术及无损检测技术进行公路隧道智能诊断,据此开发相应的健康复原技术。

5 结语

随着我国公路交通事业建设的快速发展,隧道健康状况日益成为公路隧道养护中极其重要的环节,从公路隧道健康因子、健康状况恶化原理、健康诊断及健康控制等方面,构建《公路隧道健康力学》,推动隧道研究的科学进展,具有重要的学术价值和工程实用价值。

参考文献:

- [1] 杨新安,黄宏伟.隧道病害与防治[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [2] 关宝树.隧道工程维修管理要点集[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 吕康成.隧道工程试验检测技术[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 万德友.我国铁路隧道病害浅析及对策的探讨[J].铁道工程学报,1998,(增刊).
- [5] 王永安,白明洲,王连俊.雷达探测方法在隧道病害治理中的应用研究[J].西部矿探工程,2002,74(1).
- [6] 刘伟.21 世纪初的我国公路隧道关键技术[J].公路交通技术,2000,(1).
- [7] 洪代玲.隧道衬砌无损检测技术的发展[J].世界隧道,1997,(1).
- [8] 冯慧民.地质雷达在隧道检测中的应用[J].现代隧道技术,2004,41(4).
- [9] 徐宏武,胡运兵,宋劲,等.应用地质雷达无损检测清凉山隧道的质量问题及评估[J].矿业安全与环保,1997,31(4).
- [10] 周立功,严炎兴,张惠生,等.探地雷达技术在隧道病害检测中的应用[J].施工技术,1998,(3).
- [11] 蔡建辉.地质雷达在高等级公路隧道衬砌质量无损检测中的应用研究[J].公路交通技术,2002,(增刊).
- [12] 邓涛,杨林德,李雷.公路隧道混凝土衬砌强度的无损检测方法研究[J].河北建筑科技学院学报,2004,21(2).
- [13] W D Friebe, Dr Ing J Krieger. Quality Assurance and Assessing the State of Road Tunnels using non-destructive Test Methods. Quality Assurance,2000.
- [14] 肖宽怀,孙宇,范明外,等.地震CT 技术在大风垭隧道地质病害诊治中的应用[J].地球物理学进展,2004,19(3).
- [15] 孙宇,肖宽怀,赵永贵.地震CT 勘探原理及其在公路隧道病害诊断中的应用[J].工程地质学报,2003,11(4).
- [16] 邱海涛,赵永贵,谭卓英,等.声波无损检测技术在南昆铁路隧道检测中的应用[J].广西地质,2002,15(3).
- [17] 蒲建雄.应变检测法在工程实际中的应用[J].甘肃科技,2004,20(5).
- [18] 许和平.对南昆线(西段)隧道衬砌渗漏水整治的思考[J].铁道工程学报,1999,62(2).
- [19] 彭新平.隧道渗漏水的综合整治[J].铁道建筑技术,1994,(4).
- [20] 贾素贞,刘仕田,张永红.襄十高速公路徐家湾隧道水害整治[J].山西建筑,2003,29(5).
- [21] 赫广成.严寒地区铁路隧道病害整治的体会[J].铁道标准设计,1992,(10).
- [22] 崔凌秋,金祥秋.寒冷地区隧道渗漏水的主要原因及预防措施[J].东北公路,2002,25(1).
- [23] 陈建勋,咎勇杰.寒冷地区公路隧道防冻保温层效果现场测试与分析[J].中国公路学报,2001,14(4).
- [24] 彭立敏,施成华,刘小兵.隧道衬砌火灾损伤程度的超声波检测试验研究[J].无损检测,2000,22(6).
- [25] 张祉道.家竹箐隧道施工中支护大变形的整治[J].世界隧道,1997,(1).
- [26] 张祉道,白继承.家竹箐隧道高瓦斯、大变形、大涌水

文章编号: 0451-0712(2005)12-0208-05

中图分类号: U445.4

文献标识码: B

粤赣高速公路龙祖山隧道洞口浅埋段施工

蔡业青, 林锋泉

(广东粤赣高速公路有限公司 河源市 517000)

摘 要: 粤赣高速公路龙祖山隧道左、右洞上陵端浅埋且为软弱的全风化花岗闪长岩地段, 施工采取了明、暗挖方案, 洞外采用套拱、护拱、钢花管注浆加固岩体以及对洞前边坡、洞口仰坡采用钢花管注浆加固措施, 洞内采用多台阶短开挖、加强支护、改变传统砂浆锚杆为注浆锚管等施工技术, 这些措施控制了全风化花岗闪长岩遇水崩解坍塌的地质病害, 成功地开通了浅埋软岩地段, 至今山体稳定, 隧道结构安全。

关键词: 隧道; 浅埋; 软岩; 施工技术

1 龙祖山隧道概况

浅埋隧道根据围岩的完整程度, 要求不同的洞顶覆盖层厚度, 见表1。根据我国隧道调查资料, V类以上围岩整体性好, 强度高, 一般不出现由于浅埋而失稳破坏的情况。通常在I~IV类围岩中设计浅埋隧道, 由于围岩自稳能力有限, 要考虑施工过程的辅助技术手段, 尤其是在施工初期, 由于围岩压力大、变形快, 极易产生坍塌, 因此, 针对具体情况采取相应的处理措施, 是浅埋隧道施工的关键问题。

表1 浅埋隧道的条件	
围岩类别	覆盖层厚度
IV	$\leq (0.5 \sim 1.0)B$
III	$\leq (1.0 \sim 2.0)B$
II	$\leq (2.0 \sim 3.0)B$

注: 本表适用于少水或无水情况; 隧道上部为2种以上岩层时应综合考虑, 其覆盖层厚度不宜包括第四系地层; 表中B为隧道洞身开挖宽度, m。

龙祖山隧道位于粤赣高速公路南段广东省东源县灯塔镇境内, 为分离式单向行车双车道隧道, 左洞里程为ZK86+210~ZK86+580, 最大埋深为72 m; 右洞里程为YK86+132~ZK86+600, 最大埋深为62 m。

龙祖山隧道穿越地段属于低山丘陵地貌, 高度在210~300 m, 相对高度约80~100 m, 坡度30°~40°, 植被较发育。进出口均有一废弃采石场, 基岩出露。洞身穿过岩体为花岗闪长岩, 大部分处于全、强风化带, II类围岩约占总长的55%, III类围岩约占总长的20%, IV类围岩仅占25%。全风化花岗岩呈粉土状, 遇水易崩解, 稳定性极差。本地区地震基本烈度为4度。

左线地表覆盖第四系坡残积土, 一般为2~3 m, 下伏基岩为花岗闪长岩, 全、强风化层厚约3~11 m, 出口端较薄, 岩层节理发育, 有4~5组, 岩体多呈碎块状。隧道进、出口岩体较破碎。

右线地表覆盖第四系残积粉土、填土, 厚2~4 m, 洞口端覆土较厚, 上陵端进口覆土约10 m, 大部分为人工填土。下伏基岩为花岗闪长岩, 全、强风化层厚5~17 m, 岩层节理发育, 有4~5组, 岩体多呈碎块状。洞口地段未见弱风化及微风化层。

区内地表水主要接受大气降水补给, 以地表径流及蒸发的形式排汇, 季节变化大。隧道穿越地段地下水主要为基岩裂隙水, 由于花岗闪长岩节理裂隙发育, 为地下水的流通及排泄提供了较好的条件, 由于降水渗透补给, 枯水季节水量甚微, 雨季右线隧道地下水丰富, 多次出现泉水涌出。

收稿日期: 2005-08-12

的整治与对策[J]. 世界隧道, 1998, (1).

[27] 陈绍林, 李茂竹, 陈忠恕, 等. 四川广(安)一渝(重庆)高速公路华蓥山隧道岩溶突水的研究与整治[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9).

[28] 吴应明. 气密性混凝土在瓦斯隧道中的应用[J]. 铁路建筑技术, 1995, (5).