

文章编号: 1006—2106(2009)03—0043—05

岩溶隧道施工关键技术探讨^{*}

陆少伟¹ 何 剑^{2**}

(1. 中铁隧道集团公司厦深铁路指挥部, 广东 普宁 515325 2 中铁隧道集团公司贵广铁路指挥部, 贵州 都匀 558000)

摘要: 研究目的: 针对我国岩溶广泛分布, 近期面临大量长大岩溶隧道修建问题的现状, 对岩溶隧道施工关键技术及方法的进一步探讨, 以最大程度地避免地质灾害的发生, 提高岩溶隧道施工技术水平。

研究结果: 本文通过新建渝怀铁路圆梁山特长岩溶隧道的施工实例阐明了岩溶隧道施工中解决类似问题的关键技术及方法, 同时也提出了今后类似工程需要加以改进的措施。该隧道不仅具有国内外罕见的舟形封闭向斜构造, 也有一般岩溶隧道的各种岩溶形态发育, 实践表明采用综合超前地质预报手段、充填型富水高压溶洞段施工、环境监测等关键技术为隧道的成功建成发挥了重要作用。

关键词: 岩溶隧道; 地质预报; 注浆; 施工

中图分类号: U455 文献标识码: A

Discussion on the Key Technologies for Construction of Karst Tunnel

LU Shao—wei, HE Jian

(1. The Xiamen—Shenzhen Railway Headquarter of China Railway Tunnel Group Co., Ltd. Puning, Guangdong 515325, China; 2. The Guiyang—Guangzhou Railway Headquarter of China Railway Tunnel Group Co., Ltd. Duyun, Guizhou, 558000, China)

Abstract: Research purposes: With construction of karst tunnel continuously in China, it is necessary to do the deep research on the technologies for construction of karst tunnel for the purposes of avoiding occurrence of geological disasters as much as possible and enhancing the construction level of karst tunnel.

Research results: This paper introduces the main technologies used for construction of Yuanliangshan Tunnel on Chongqing—Huaihua Railway Line and gives the measures for improving the technologies to be used for similar tunnel in future. The tunnel structure is a rarely navigular closed syncline with the features of the all karst developments of ordinary karst tunnel. The construction practice shows the integrated geological prediction in advance, filling construction in high—pressure water—rich karst region, environment monitoring and other key technologies play an important role in successful construction of the tunnel.

Key words: karst tunnel; geological forecast; grouting; construction

1 概况

新建渝(重庆)怀(怀化)铁路圆梁山隧道, 全长 11 070 m 是渝怀铁路最长的隧道。2001年 3月进洞施工, 2003年 8月 6日通过迂回导坑实现进出口工区

贯通, 2003年 12月 28日实现平导全隧贯通, 2004年 9月全隧主体工程完工, 2005年建成通车。2006年完成附属工程施工和后期岩溶整治。通车 3年来运营状态良好。

* 收稿日期: 2009—01—05

** 作者简介: 陆少伟, 1962年出生, 男, 高级工程师, 中铁隧道集团公司厦深铁路指挥部常务副指挥长; 何剑, 1979年出生, 工程师, 中铁隧道集团公司贵广铁路指挥部工程部部长。

2 主要技术问题及施工难点

圆梁山隧道穿越地区主要地质构造为毛坝向斜和桐麻岭背斜。其主要不良地质为深埋充填型溶洞、岩溶突泥、突水、断层破碎带、煤层瓦斯和石油天然气等。

特别是由于毛坝向斜为罕见的锅状封闭向斜,使得该段岩溶水及其溶洞充填物呈高压存在,施工过程中曾发生过大规模爆喷,给工程施工带来很大危害。毛坝向斜段地质情况如图1所示。

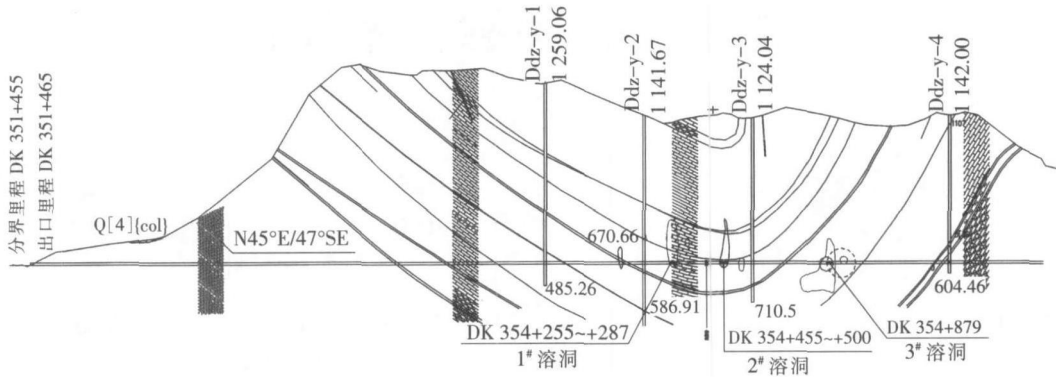


图1 圆梁山隧道毛坝向斜地质纵断面图(单位: mm)

该隧道的主要技术问题为:

- (1) 岩溶发育情况的准确预报;
- (2) 富水高压充填性溶洞溶洞充填物的注浆加固;
- (3) 富水高压溶洞段的施工;
- (4) 隧道修建引起的高压岩溶水重分布的岩溶水后处理;
- (5) 隧道修建可能引起的环境变化。

其主要施工难点为如何进行准确的超前地质预报及富水高压溶洞段施工。

3 施工过程中采取的主要技术手段

3.1 地质预报

进行地质预报的目的一是避免施工期间地质灾害的发生造成人身及财产的不必要损失,二是通过分析地质预报结果必要时对设计进行调整。目前的主要手段为地质素描、物探、钻探及洞探,其可靠性也基本上是依该先后顺序依次较高。但在岩溶地区对于岩溶或溶洞的预报仅靠某一单一手段是很难做到准确预报的,以下是目前常用的主要技术手段及其优缺点,以供综合采用时参考。

3.1.1 TSP202(TSP203)超前地质预报

3.1.1.1 优点

- (1) 适用范围广。适用于极软岩至极硬岩的任何地质情况。
- (2) 预报距离长。能预报掌子面前方 100~350 m 范围内的地质状况,围岩越硬越完整预报长度就越大。
- (3) 对隧道施工干扰小。它可在隧道施工间隙进

行,即使专门安排此项工作,也只需 30 min 左右。

- (4) 提交资料及时。在现场采集数据的第 2 天即可提交正式成果报告。

3.1.1.2 缺点

- (1) 预报准确性:其预报地质体距离掌子面的位置是根据 24 个爆破孔与接收器之间的弹性波速度的平均值和地质体反射波到达接收器的时间来确定的,由于弹性波速度的差异而导致地质体预报位置与实际情况有所差异。

- (2) 预报精度:它所能反映出的地质体的宽度是根据采样间隔和岩体弹性波速度来确定的,如采样间隔取 80 μs,弹性波速度为 5 000 m/s 则能预报出的地质体的宽度为 0.4 m。

- (3) 预报断层、弱硬岩接触面等面状结构反射信号较为明显,而预报溶洞等点状地质体则不尽如人意,因其预报原理和计算模型是以平面为计算依据,对宽度小于 0.4 m 的小型溶洞反映不明显。

3.1.2 地质雷达

3.1.2.1 优点

- (1) 在地表探测 5~30 m 范围内的地下地层或地质异常体(溶洞、断裂、空隙等)反射信号比较明显;灰岩地区隧道铺底前采用中~低频率的天线可作为探明隧底隐伏岩溶洞穴的手段。

- (2) 采用高频率的天线进行隧道混凝土衬砌质量无损检测比较理想。

3.1.2.2 缺点

- (1) 仪器密封性差,易造成仪器损坏,操作起来费时费力,探测距离短,效果不好。

(2) 隧道内的环境条件与地质雷达的理论基础——半无限空间不吻合,加之洞内钢拱架、钢筋网、锚杆、钢轨等金属构件的影响,探测结果一般不太理想。

3.1.3 红外探测

3.1.3.1 优点

仪器小巧轻便,操作简单,可实现全空间全方位探测,能预测隧道外围空间及掘进面前方 30 m 范围内是否存在隐伏水体或含水构造,基本不占用隧道施工时间,资料分析简洁、快速、直观。

3.1.3.2 缺点

它只能探测出探测点前方 30 m 范围内有没有水,至于水量大小、水体宽度及具体位置等则难以说清,也就是说目前红外探测只限于定性阶段。

3.1.4 超前地质钻孔

3.1.4.1 优点

(1) 可比较直观地得到钻孔所经过部位的地层岩性、岩体完整程度、裂隙度、溶洞大小、有没有水以及可测水压高低等情况。

(2) 煤系地层可进行孔内煤与瓦斯参数测定,采取适宜防治措施,防止煤与瓦斯突出危险性。

3.1.4.2 缺点

费用高、占用隧道施工时间长,且资料只是一孔之见。

3.1.5 洞探法

优点是可以直观、准确地预报地质情况,也可以起到其它辅助施工的作用;缺点是费用比较昂贵。

3.1.6 地质素描

该方法设备简单、操作方便、不占用隧道施工时间,提交资料及时,费用低,但对操作人员地质知识水平要求较高,一般准确性难以保证。

由于圆梁山隧道设计有全隧贯通平导及迂回导坑,加上其地质情况复杂,施工时采用了以上各种方法,最后汇总进行综合分析,即集物探、钻孔、洞探、地质素描等手段为一体的综合地质预报技术。

3.2 富水高压充填性溶洞溶洞充填物的注浆加固

富水高压充填性溶洞的开挖在不进行预加固的情况下是无法进行的,而在富水高压的情况下进行注浆同样很难做到,在充填物为粉细砂或流塑状粘土的情况下高压水使得成孔都很困难,必须有控制的边泄水减压,边钻孔注浆,圆梁山隧道采用的是平导减压正洞注浆或正洞减压平导注浆的方法,排水点距注浆点 30 m。经现场多次注浆试验确定,其主要注浆参数如表 1 所示。

表 1 主要注浆参数表

参数名称	注浆参数	
	正洞	平导
加固范围	掌子面及开挖轮廓线外 5 m 或 8 m	掌子面及开挖轮廓线外 3 m 或 5 m
钻孔深度	30 ~ 35 m	25 ~ 30 m
止浆岩墙厚度	3 ~ 5 m	1.5 ~ 3 m
扩散半径	0.5 ~ 2.0 m	
注浆段长	1.0 ~ 5.0 m (根据钻孔情况确定)	
注浆速度	10 ~ 100 L/min	
注浆终压	6.0 ~ 9.0 MPa	
凝胶时间	单液浆 30 min ~ 7 h 双液浆 30 s ~ 3 min	

注浆材料在通常情况下,选用普通水泥—水玻璃双液浆;特殊情况下,可选用超细水泥—水玻璃双液浆或 TGRM 以及 HSC 浆液。水泥—水玻璃浆液配比为 $W:C=(0.8\sim1):1$, $C:S=1:1$,水玻璃浓度为 35 Be。采用前进式分段注浆,注浆顺序采用间隔跳孔、跳排,由下往上、由外到内的原则,实施挤密型注浆,当注浆压力达到终压,流量小于 5 L/min 时,可结束注浆。

2 号溶洞正洞 DK 354+455 处自 2003 年 8 月 13 日开始实施全断面超前帷幕注浆,到 2003 年 11 月 8 日结束,共完成注浆孔 123 个,注浆量 9 100 29 m³,加固了地层,改善了地质条件,为 2[#]溶洞的最终攻克打下了基础。

3.3 富水高压溶洞段的施工

铁路长大隧道一般是全线工期控制工程,当遇到不良地质如岩溶地区遇到溶洞或规模较大的断层时进度必然受阻而影响工期,必须通过增设辅助导坑,形成不良地质段处理和一般地段平行施工的局面。这一方面可以降低不良地质段施工难度、保证工期,另一方面可以增加生产运输通道、保证施工安全,圆梁山隧道分别在遇到 2[#]、3[#]溶洞时增加了 2 个迂回导坑,其导坑布置如图 2 所示。

3.4 隧道修建引起的高压岩溶水重分布的岩溶水后处理

圆梁山隧道为富水高压岩溶隧道,由于注浆不可能达到注浆加固圈均匀如—全部封堵输水通道,由于隧道的修建改变了地层水的输送环境,二次衬砌全部完成后岩溶水必将进行重新分布。圆梁山隧道是先完成正洞衬砌,后进行平导衬砌,且平导、横通道设计防水等级及抗水压值低于正洞。当平导高压富水区衬砌施工完毕后,由于岩溶水完全封堵在衬砌以外(或排水盲管排水能力小于来水量),使得岩溶水发生重分布,随着水压升高,高压水首先击溃强度薄弱的平导,2[#]、3[#]溶洞先后发生大规模涌水涌沙,由于 2[#]溶洞涌水

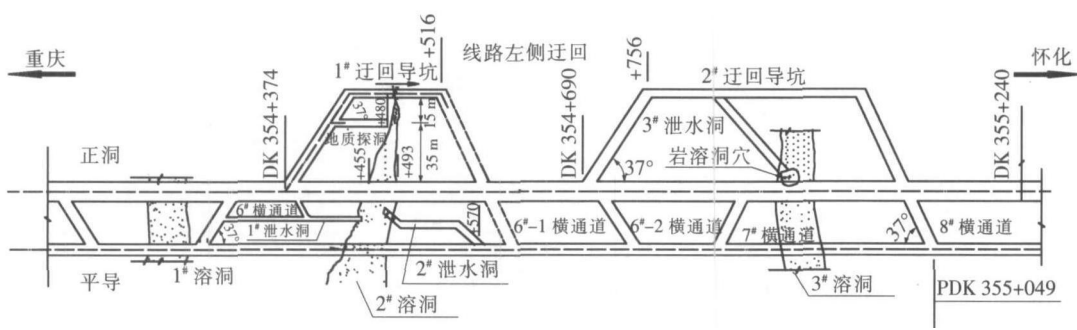


图 2 毛坝向斜高压富水岩溶地段辅助坑道布置图

泥沙含量低, 后期按照“堵浑排清”的原则对其施做泄水洞(泄水洞布置如图 3 所示), 而对 3° 溶洞根据其涌水泥沙含量较大的情况采用注浆封堵的方案进行了整治(注浆设计如图 4 所示)。

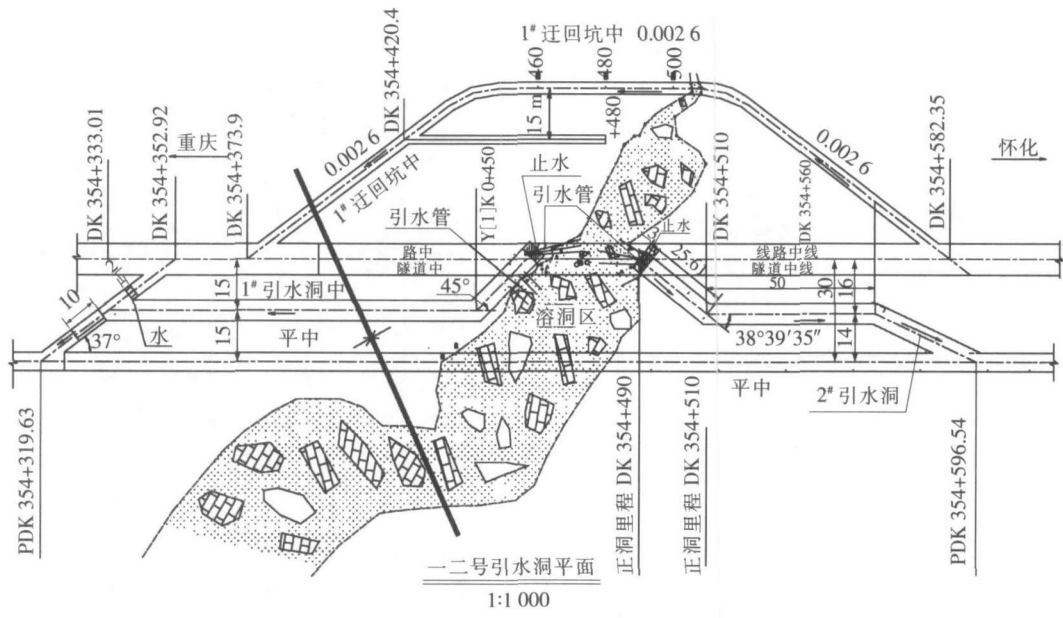


图 3 毛坝向斜 2° 溶洞泄水洞布置图

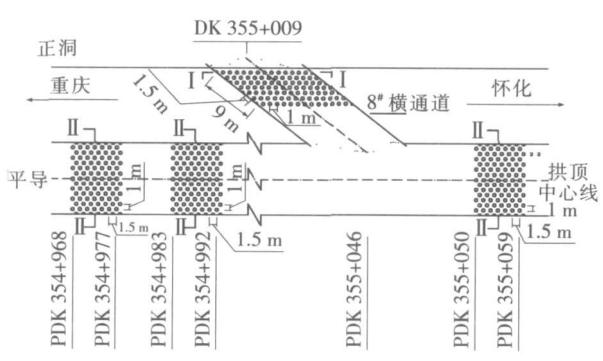


图 4 毛坝向斜 3° 溶洞注浆孔布置图

3.5 对隧道修建可能引起的环境变化的监控

通过对隧道通过地区影响范围分析, 确定影响范围内可能发生变化的泉点、地下暗河作为观测点, 观测施工前后水量水位的变化, 同时也监测洞内涌水量与地表降雨的关系及隧道排水对地表植被的影响和地表塌陷情况。

隧道通过区毛坝向斜地段地表井泉点、地下暗河出口分布如图 5 所示。

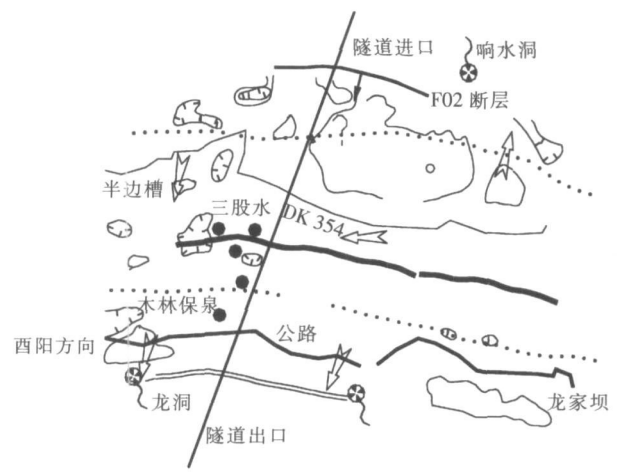


图 5 距隧道轴线较近的地表井泉点、悬挂泉分布示意图

监测结果表明:

3 5 1 泉点水为底层裂隙水, 与地表降雨关系密切, 隧道施工对其水量变化影响不大, 距隧道轴线距离较

近的龙洞悬挂泉水量与地表降雨及隧道施工的关系如图 6、图 7、表 2 所示。

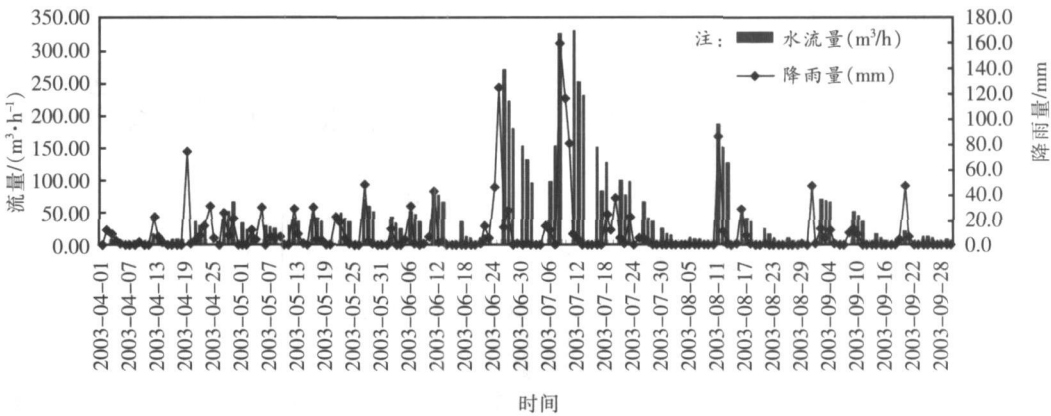


图 6 2003 年 4—9 月雨季地表降雨与龙洞流量历时对比曲线

表 2 隧道与地表连通前后 2 个枯雨季节地表降雨与龙洞流量监测结果

时间		10月	11月	12月	1月	2月	3月
月降雨量 /mm	2002— 2003年	138.7	71.1	68.2	36.5	83.6	62.2
	2003— 2004年	82.7	90.3	23.8	44	53.4	107.2
平均流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	2002— 2003年	5.7	9.98	7.68	4.67	10.85	11.35
	2003— 2004年	8.39	6.25	4.55	未测	未测	11.15

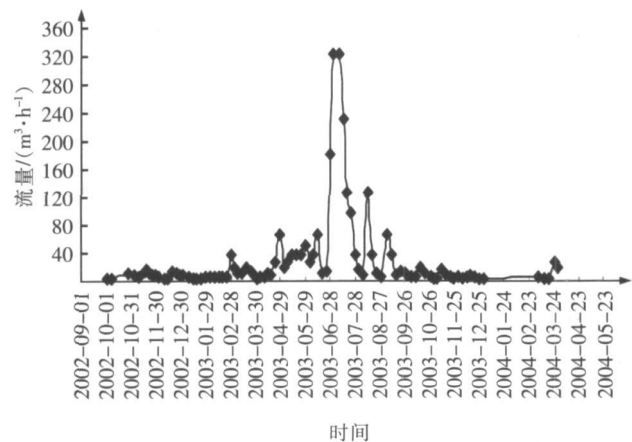


图 7 龙洞水流量历时曲线

3 5 2 地表塌陷

当溶洞充填物大量排出时,随着时间的延长,空腔上部充填物会逐渐坍塌,直至地面,形成陷坑,如图 8 所示。该图为受 3[#]溶洞突泥影响且后期长时间未进行溶洞封堵,造成溶洞内充填物流失,从而引起的严重地表塌陷。

3 5 3 隧道修建对地表植被的影响

经调查,截至目前,隧道附近地表植被的枯萎或茂盛只与地表降雨的丰沛程度有关,隧道修建没有变化。



图 8 3[#]溶洞上方 1[#]陷坑

4 结论

- (1) 鉴于岩溶地区准确的进行溶洞探测采用单一手段还比较困难,岩溶地区隧道施工地质预报应采用综合超前地质预报,应在区域地质分析的基础上首选 TSP203 进行长距离探测,辅以红外线探水,地质异常时施做超前钻孔。若设平行导坑,可充分利用平导超前探明地质情况;若遇到富水高压溶洞,设置迂回导坑是非常必要的。
- (2) 对于岩溶隧道,当开挖通过后,在施做隧底混凝土前应采用地质雷达,必要时施做垂直钻孔进行潜
- (下转第 53 页)

[4]

Seokwon Jeon, Jongwoo Kim, Youngho Seo, Changwoo Hong. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock— a scaled model test and numerical analysis [J] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004, 41(3): 1—6

[5]

赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 213—217.

[6]

吴梦军, 连晋兴, 黄伦海, 等. 连拱隧道围岩稳定性模型试验 [J]. 地下空间, 2004, 24(4): 461—464

[7]

王明年, 关宝树, 何川. 三车道公路隧道在不同构造应力作用下的力学行为研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 51—55

[8]

王戌平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004

[9]

张祥康. 鉴定地下洞穴坍塌机理的离心模型试验研究 [J]. 四川水力发电, 1989(9): 54—59

[10]

周小文, 濮家骊, 包承钢. 隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究 [J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 32—36

[11]

SterpiD. An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999(23): 1427—1454

[12]

SterpiD. and CividiniA. A Physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening medium [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2004, 37(4): 277—298

[13]

汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 450—456

(上接第 47 页)

伏溶洞探测,发现空腔或破碎带应予加固。

(3)岩溶地区,特别是有高压水存在时,进行隧道衬砌设计,辅助坑道与正洞其防排水等级可以不同,但其抗水压承载能力应保持一致。

(4)富水高压溶洞在其两端应设置加强隔离措施,适当分仓,防止岩溶水纵向或横向窜流。

(5)溶洞水一般由大气降雨补给,从某一排泄口很快排出,对于溶洞水在进行隧道的防排水设计时应坚决地排,不会因排泄溶洞水对环境造成危害。

参考文献:

[1]

中铁隧道集团有限公司. 高压富水岩溶深埋特长隧道修建技术 [J]. 洛阳: 中铁隧道集团有限公司, 2007

[2]

YJGF 24—2004 高压富水深埋充填型岩溶隧道施工工法 [S].

[3]

罗琼. 岩溶隧道施工技术 [J]. 铁道工程学报, 2005(3): 65—71.

[4]

齐传生. TSP202 隧道地震波超前地质预报系统的应用 [J]. 现代隧道技术, 2000(1): 36—40