

文章编号: 1674—8247(2019)06—0091—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.019

## 羊角一号隧道大型半充填溶洞处理措施研究

李开兰<sup>1</sup> 王明慧<sup>1</sup> 王 秋<sup>2</sup> 杨 宝<sup>2</sup> 张 桥<sup>1</sup>

(1. 渝黔铁路有限责任公司, 重庆 400014; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**渝黔铁路羊角一号隧道施工中揭示的大型半充填型溶洞具有空间分布差异大、纵向延伸距离长、隧道基底充填物均一性与稳定性差等特点。文章基于溶洞发育特征与工程补勘资料,从施工难度、运营风险、工程投资等多个方面进行了比较分析,最终确定了桩板结构跨越的处理方案。通过结构计算与工程类比对桩板结构进行了详细设计,并根据隧道拱墙部溶腔规模采取了回填或护拱方案,针对不同的基底条件采取钢花管或袖阀管注浆加固的处理措施。工程实践表明,羊角一号隧道大型半充填型溶洞综合处理措施的经济技术效果良好,可供类似工程借鉴参考。

**关键词:**隧道; 半充填型溶洞; 桩板; 跨越

**中图分类号:**U452.1 **文献标志码:**A

### Discussion on the Treatment Measures of Large-scale Half Filled Karst Cave in Yangjiao No. 1 Tunnel

LI Kailan<sup>1</sup> WANG Minghui<sup>1</sup> WANG Qiu<sup>2</sup> YANG Bao<sup>2</sup> ZHANG Qiao<sup>1</sup>

(1. Chongqing-Guizhou Railway Co., Ltd., Chongqing 400014, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The large half-filled cave revealed in the construction of the Yangjiao No. 1 tunnel of the Chongqing-Qianjiang Railway has the characteristics of large spatial distribution differences, long longitudinal extension, poor uniformity and stability of the tunnel base filling. Based on the karst development characteristics and engineering geological replenishment data, a comparative analysis is made from various aspects such as construction difficulty, operational risk and engineering investment in this paper, and finally the treatment scheme of the pile-plate structure is determined. The pile-plate structure is designed in detail by structural calculation and engineering analogy, the backfilling or protection arching scheme is adopted according to the size of the cavity of the tunnel arch wall, and the treatment measures of steel flower pipe or sleeve valve pipe grouting reinforced are adopted for different substrate conditions. The engineering practice shows that the economic and technical effects of the comprehensive treatment measures for large half-filled cave in Yangjiao No. 1 Tunnel are good, which can be used as reference in similar projects.

**Key words:** tunnel; half-filled cave; pile-plate; cross

我国西南山区分布着世界上面积最大的岩溶发育区<sup>[1]</sup>,总面积约 53.3 万 km<sup>2</sup>,其中重庆渝东北、渝东南、川东地区碳酸盐岩与碎屑岩夹碳酸盐岩分布广泛,地下水发育不规律,岩溶地质、水文地质与区域构造复

杂多变,对工程建设影响深远。在我国蓬勃的交通基础建设的强力驱动下,川渝片区的隧道建设规模提上了新的高度,但同时也面临着愈加棘手的岩溶处理问题。

收稿日期:2019-11-23

作者简介:李开兰(1977-),男,工程师。

引文格式:李开兰,王明慧,王秋,等. 羊角一号隧道大型半充填溶洞处理措施研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):91-95.

LI Kailan, WANG Minghui, WANG Qiu, et al. Discussion on the Treatment Measures of Large-scale Half Filled Karst Cave in Yangjiao No. 1 Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 91-95.

目前国内针对岩溶处理的工程案例越来越多,如长昆铁路朱砂堡二号隧道采用大体积空心混凝土回填方案对特大型岩溶空腔及暗河进行了处理<sup>[2]</sup>;宜万铁路龙鳞宫隧道采用“路基+明洞”的方案成功穿越了1号大型溶洞,并通过强夯与注浆加固大幅减少了路基高填方的工后沉降<sup>[3-4]</sup>;宜万铁路马鹿箐隧道针对大型富水充填型溶洞采取了注浆加固、双层支护、盖挖法等综合技术,确保了隧道的安全通过<sup>[5-6]</sup>;重庆奉巫高速羊角坝隧道通过对多个方案的综合比选,采用了左偏避让大型溶洞的方案,取得了良好的经济技术效果<sup>[7]</sup>。但针对岩溶隧道的独特性与复杂性,如何结合岩溶隧道的特点,提出适合的工程处理措施仍是值得研究的方向。

本文结合渝东南地区岩溶发育特点,从降低施工风险、保证运营安全的角度出发,以渝黔铁路羊角一号隧道为工程依托,开展大型半充填型溶洞处理技术研究,以期类似工程提供借鉴参考。

## 1 工程背景<sup>[8]</sup>

渝黔铁路羊角一号隧道位于重庆市綦江境内,全长5 272 m,旅客列车设计行车速度为200 km/h,采用重型有砟轨道。隧道洞身主要通过寒武系中上统娄山关群地层,岩性为浅灰、灰白色薄~中厚层状白云质灰岩、白云岩,最大埋深约271 m。隧址区地处四川盆地南端向贵州高原过渡地带,为构造侵蚀、剥蚀山地地貌。

### 1.1 溶洞规模

2013年10月19日横洞向正洞挑顶施工时揭示一大型溶洞。溶洞走向与线路基本平行,位于隧道洞身D1K 112+244~D1K 112+404段,长160 m,溶洞可见高度4~14 m,宽3~21 m,溶洞发育情况及与隧道的空间位置关系如图1、图2所示。

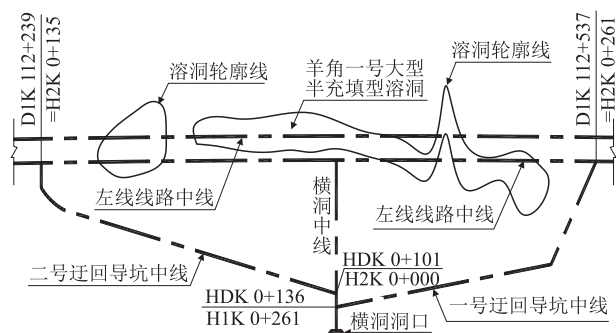


图1 羊角一号大型半充填型溶洞与隧道平面位置关系示意图

### 1.2 溶洞地质特征

溶洞发育于寒武系中上统娄山关群的白云岩夹白

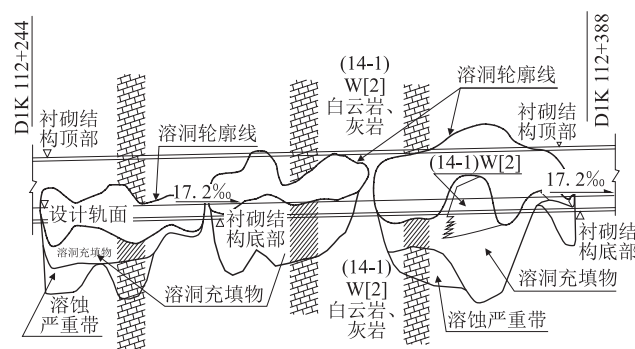


图2 羊角一号大型半充填型溶洞与隧道立面位置关系示意(中线断面)图

云质灰岩及石灰岩地层中,洞内充填物为第四系全新统堆积物,主要由碳酸钙沉淀物、崩塌堆积的块石土、冲积的黏土、圆砾土等构成,堆积物各组成物分布无规律,无明显的成层特征。

羊角一号隧道横洞工区受官田寺背斜的构造影响,区域发育两组构造节理,其中J1组节理走向与隧道揭示的溶洞发育方向一致,是控制该溶洞发育的构造节理。

隧道横洞工区处于岩溶水垂直入渗带,由于地表未形成如溶蚀洼地、岩溶漏斗、落水洞等地表岩溶形态,类似可溶岩区大型吸水构造的缺失从宏观上削弱了浅部地下水垂直循环的量级,但地表高位冲沟水的补给使得溶洞发育规模较大。溶洞内常年流量不大,但溶洞内大块径卵石表明,历史洪期水量较大。

### 1.3 工程地质评价

溶洞顶板、侧壁及局部洞底表层分布有石钟乳、石笋、石柱及石幔,其稳定性差,施工扰动易坠落。溶洞内充填物从宏观上看成分差异大,厚度突变快(厚度1~15 m不等),均一性差,堆积物中粗颗粒、大块径物质不易流失细颗粒物质在动水作用下流失后导致稳定性恶化,对隧道结构安全影响极大。溶洞主要接受冲沟水下渗补给,预测溶洞水总量为3 400 m<sup>3</sup>/d。

## 2 处理方案研究

### 2.1 处理方案

羊角一号隧道溶洞发育规模较大,空间分布差异大,纵向延伸距离长,隧道拱部以上主要分布于基岩中,洞身主要穿越溶洞空腔,隧道基底主要分布于溶洞软弱充填物及溶蚀带上。由此可见,溶洞处理应主要考虑隧道的基底。结合溶洞的分布形态与地质特征,处理方案有动静分离桥跨方案、桩板跨越方案和基底处理方案。

#### (1) 动静分离桥跨方案

羊角一号隧道 D1K 112 + 239. 15 ~ D1K 112 + 380. 85 段采用动静荷载分离结构跨越大型半充填型溶洞,桥梁按常规结构设计,设置 4 跨 32 m 简支梁,隧道衬砌边墙位置分别设置纵梁。综合考虑梁高、轨道高度、梁下净空要求,桥梁轨下 5. 4 m 范围内须开挖。电缆槽设置于隧道结构上,梁宽 9. 26 m。

(2) 桩板跨越方案

D1K 112 + 244 ~ D2K 112 + 388 段采用桩板结构跨越大型溶洞,隧道设置特殊底板型钢筋混凝土衬砌,底板厚度 1. 5 m;桩基础采用直径 1. 25 m 的钻孔桩,沿隧道横向布置 3 根桩,纵向桩间距 6 m。

(3) 基底处理方案

隧道洞身 D1K 112 + 244 ~ D1K 112 + 404 段采用基底溶洞充填物注浆加固 + 空腔 C20 混凝土回填的处理方案。一般地段,溶洞底部堆积物采用  $\phi 89$  钢花管注浆加固,钢管间距 1 m  $\times$  1 m,梅花型布置;基底下存在隐伏充填型溶洞段,采用  $\phi 76$  袖阀管注浆加固。

2.2 方案选择

结合本工程的实际情况与特点,对各方案进行对比优选,其优缺点对比分析如表 1 所示。

表 1 方案优选分析表

处理方案	优点	缺点
动静分离桥跨方案	(1) 结构跨度大,能够避开溶洞设置基础 (2) 围岩与隧道衬砌静荷载与列车动荷载分别由不同的结构承担,结构安全可靠	(1) 墩台基础体积大,且为了满足梁下净空要求,溶洞内开挖工程量大 (2) 洞内施作空间小,采用架桥机或满堂支架现浇施工难度大 (3) 工期较长 (4) 工程投资高
桩板跨越方案	整体结构稳定性好,沉降控制效果好,能够保证隧道运营安全	(1) 洞内施工深桩基础难度较大 (2) 工程投资相对较高
基底处理方案	(1) 施工不需要大型机械设备,可操作性强 (2) 工程投资相对较小	(1) 堆积体厚度大且分布不均匀,对注浆工艺的要求较高,注浆质量控制难度大 (2) 工后沉降不宜控制,难以满足轨道沉降要求 (3) 注浆加固的耐久性值得商榷,后期运营风险高

从表 1 可以看出,动静分离桥跨方案施工难度大,工期较长,工程造价较高,不宜采用。基底处理方案存在基底加固质量难以控制、存在后期运营风险的问题,应予以舍弃。经过对比最终采用了桩板跨越方案。

3 大型半充填型溶洞处理技术

3.1 隧道衬砌与桩板结构设计

通过 MIDAS/GTS 对隧道拱墙衬砌、底板、纵梁及桩配筋进行计算设计。

(1) 隧道衬砌设计

隧道溶洞段采用复合式底板型衬砌,初期支护采用工程类比法设计,设置 25 cm 喷射混凝土,1 m 间距的 I 18 拱墙钢架,拱部采用  $\phi 42$  超前小导管加强支护,环向间距 0. 4 m,每环 30 根,纵向间距 3 m,单根长 4. 5 m。

溶洞段二次衬砌拟采用 50 cm 的 C35 钢筋混凝土结构,二次衬砌按荷载 - 结构法进行计算设计,采用弹性梁单元模拟二次衬砌,考虑围岩的主动荷载与被动抗力。其中主动荷载包括围岩压力、衬砌自重、铺底荷载及列车荷载;被动抗力采用仅受压弹簧模拟,采用竖向固定约束考虑端承桩基础的支撑作用。

溶洞段隧道按Ⅳ级围岩深埋考虑,以桩的纵向间距 6 m 为计算单元进行验算,按破损阶段法检算结构截面强度,并计算正常使用状态下的裂缝宽度。其中衬砌按偏压构件考虑,底板按弯剪构件考虑,计算结果如表 2、表 3 所示。

表 2 隧道衬砌验算及配筋

部位	轴力 /kN	弯矩 /(kN·m)	截面高度 /cm	钢筋直径 /mm	钢筋间距 /mm	安全系数	裂缝宽度 /mm
拱顶	- 9. 28	15. 66	50	20	125	27. 48	0. 02
拱腰	- 160. 69	- 0. 38	50	20	125	93. 77	满足
边墙	- 523. 79	- 135. 0	50	20	125	9. 05	0. 08
拱脚	- 473. 57	44. 38	50	20	125	21. 57	满足

表 3 底板验算及配筋

部位	剪力 /kN	弯矩 /(kN·m)	截面高度 /m	配筋	正截面安全系数	斜截面安全系数	裂缝宽度 /mm
板左	- 135. 7	- 168. 13	1. 5	28@ 125	16. 08	19. 26	0. 04
板右	379. 45	919. 83	1. 5	28@ 125	2. 94	6. 89	0. 20

根据计算结果,溶洞段隧道二次衬砌上下对称配筋,主筋选用  $\phi 20$  mm HRB400 钢筋、纵向间距 125 mm,底板上下侧均单排对称配筋,主筋选用  $\phi 28$  mm HRB400 钢筋、纵向间距 125 mm。

(2) 纵向暗梁及桩基设计

隧道底板厚 1. 5 m,于桩顶设置纵向暗梁,其竖向荷载主要考虑围岩荷载、衬砌自重及列车荷载,按最不利荷载组合取值为 1 521 kN/m。计算模型如图 3 所示。

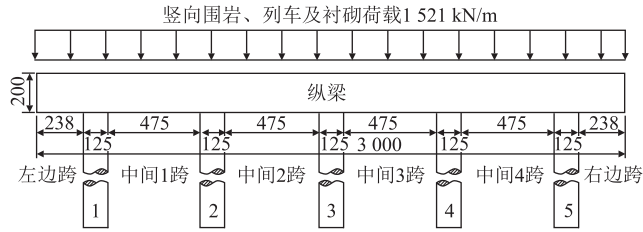


图 3 纵梁计算模型简图 (cm)

计算结果显示中间跨纵梁下部所受正弯矩较大,两端桩顶纵梁上部负弯矩值较大。剪力值分布比较均匀,各跨数值相差不多。按弯剪构件考虑纵梁的验算,其配筋计算结果如表4所示。

表4 纵梁验算及配筋

部位	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	截面 $h \times b$ /m	主筋	箍筋	正截面安全系数	斜截面安全系数	裂缝/mm
中间1跨左	2 849.24	2 821.28	2.0 × 1.5	双排 $\phi 28@150$	$\phi 12@200(6)$	3.09	3.76	0.17
中间1跨中	61.73	-988.65	2.0 × 1.5	双排 $\phi 28@150$	$\phi 12@200(6)$	8.83	173.39	0.07
中间1跨右	-2 372.7	1 688.77	2.0 × 1.5	双排 $\phi 28@150$	$\phi 12@200(6)$	5.17	4.51	0.12

由表4可知,纵梁上下对称配筋,上下侧均采用双排布置直径28 mm,间距150 mm的钢筋时,结构安全系数和裂缝宽度满足规范要求。

根据环向和纵向模型的计算结果,得到桩身最大压力为6 885.6 kN,桩构件计算长度取15 m,混凝土等级采用C35。根据抗压承载能力验算与工程经验,确定桩身采用最小配筋率。

3.2 溶洞处理

(1)当溶洞顶部存在小范围空腔时,采用C20混凝土回填密实,设置 $\phi 22$ 砂浆锚杆,每根长3.5 m,间距1.2 m × 1.2 m,梅花形布置,端部预留50 cm,与C20回填混凝土连接在一起,如图4所示。

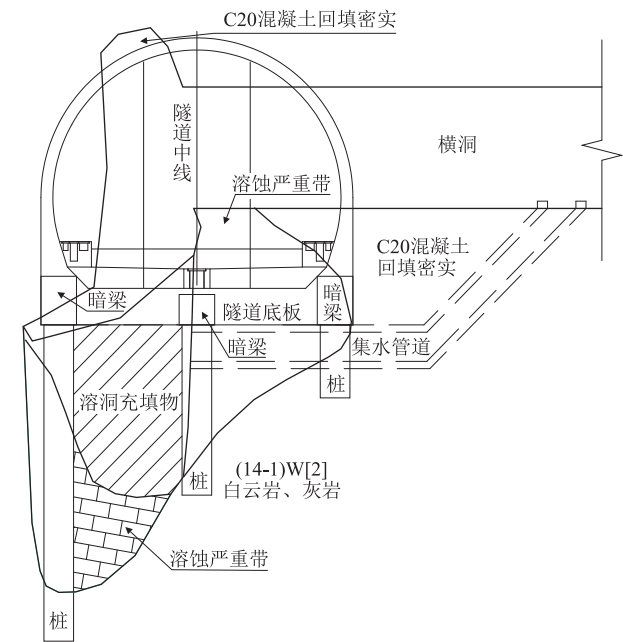


图4 溶洞处理典型断面一

(2)当隧道拱墙外部空腔范围较大时,首先对溶腔壁进行喷锚支护,设置厚10 cm的C25喷混凝土,长3.5 m的 $\phi 22$ 砂浆锚杆,梅花型布置,间距1.2 m × 1.2 m的 $\phi 6$ 钢筋网片,网格间距25 cm;并于衬砌外设置厚2 m的C20混凝土护拱,内设间距1 m的I18型钢钢架,采用M10浆砌片石回填基础,如图5所示。当桩顶和桩身大范围处于溶洞充填物中时,为降低桩土相对刚度、约束桩顶位移、提高地基承载能力及改善

施工条件,对桩间土采用 $\phi 75$ 钢管注浆加固,钢管桩间距1.2 m × 1.2 m,梅花型布置,钢管长5 m。注浆浆液采用水泥浆,水灰比控制在0.5:1 ~ 1:1,注浆压力0.3 ~ 0.5 MPa。

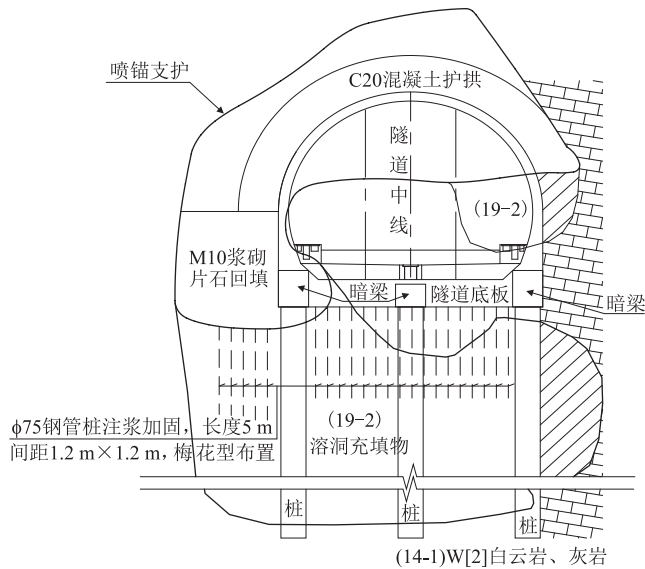


图5 溶洞处理典型断面二

(3)根据地质补勘资料显示,隧道基底存在隐伏溶洞,为保证桩基础及整个隧道结构的稳定性,在施作钻孔桩前,采用钢制袖阀管分段注浆加固的方式对下方溶洞进行处理,管间距1.2 m。注浆浆液采用水泥浆,水灰比0.75:1 ~ 1.5:1,注浆压力2 ~ 3 MPa,浆液扩散半径1 ~ 1.2 m,如图6所示。

3.3 迂回导坑设计

由于溶洞规模较大,基础需大量补勘、岩溶水需进行至少一个水文年观测,工程处理措施较为复杂且对正洞施工干扰较大。为保证隧道工期,于D1K 112 + 324处横洞,向大、小里程方向各增设一迂回导坑。

3.4 防排水设计

岩溶隧道地下水“宜疏不宜堵”<sup>[9]</sup>,因此,应结合工程特点建立通畅且满足要求的排水系统。

(1)隧道拱墙设置复合防水层,衬砌背后设置环向排水盲管,环向盲管间距5 m,隧道拱墙范围内岩溶水通过盲管收集引入侧沟,最后通过中心沟排出



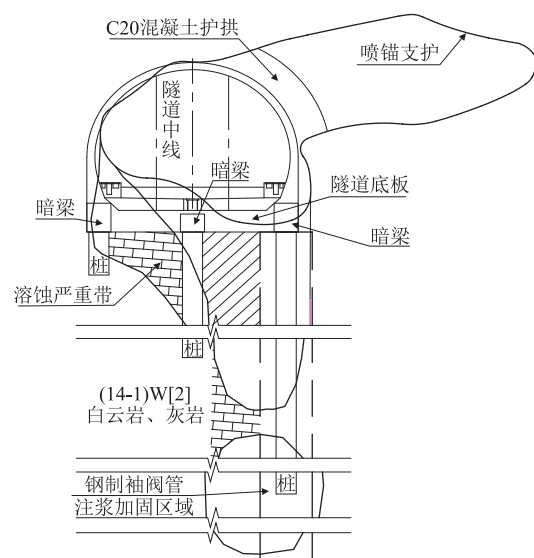


图6 溶洞处理典型断面三

洞外。

(2)为引排隧底岩溶水,在横洞位置衬砌底板下设置钢筋混凝土集水管道,接入横洞侧沟,以便当水流径路阻塞时,地下水可沿此通道漫出,从横洞排出。

## 4 结束语

羊角一号隧道已通车运营近2年,根据工务段调查反馈,目前隧道衬砌结构稳定,排水系统畅通。本文依托羊角一号隧道,总结提出了一套针对大型半充填型溶洞的处理技术,主要得出以下结论:

(1)溶洞充填物通常均一性差、厚度变化大、稳定性差,为满足工后沉降要求,确保运营安全,结合溶洞的形态、规模及分布特征,本工程采用桩板结构跨越溶洞,经济技术效果良好。

(2)溶洞拱墙部应根据隧道衬砌外露空腔的范围大小,选取适宜的处理方式,包括混凝土回填、溶腔壁喷锚防护、衬砌外设置护拱等。

(3)当桩顶和桩身大范围处于溶洞充填物中时,为降低桩土相对刚度、约束桩顶位移、提高地基承载力及改善施工条件,可结合充填物岩性成分选择合适的方法对桩间土进行加固处理。

(4)当桩底存在充填型隐伏溶洞且地质条件适宜时,可采用袖阀管分段注浆对其进行加固处理,以确保桩基础的稳定和隧道整体结构的安全。

## 参考文献:

[1] 蒲俊兵. 重庆地区岩溶地下河发育与分布的基本特征[J]. 中国

岩溶, 2013, 32(3): 266-279.

PU Junbing. Development and Distribution of Karst Subterranean Streams in Chongqing[J]. China Carsologica Sinica, 2013, 32(3): 266-279.

[2] 林本涛, 巩江峰. 朱砂堡二号隧道特大型岩溶空腔处理技术[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 91-96.

LIN Bentao, GONG Jiangfeng. Treatment Technology of Super Large Karst Cavity in Zhushabao No. Two Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 91-96.

[3] 马涛. 宜万铁路龙麟宫隧道1号大型溶洞处理技术研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(8): 125-128.

MA Tao. Study on Processing Technology of Large-scale Cave at The Longlingong No. 1 Tunnel of Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(8): 125-128.

[4] 宋长甫. 龙麟宫隧道大型溶洞支顶加固技术[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(9): 78-79.

SONG Changfu. Large-scale Cave Roof Reinforcement Technology of Longlingong Tunnel [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(9): 78-79.

[5] 李鸣冲. 宜万铁路马鹿箐隧道“+978”溶洞处理技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2012, 29(2): 30-33.

LI Mingchong. Study on Processing Technology for “+978” Cave in Malujing Tunnel on Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Construction Technology, 2012, 29(2): 30-33.

[6] 杨兵, 肖广智. 宜万铁路马鹿箐隧道高压富水岩溶治理技术[J]. 中国工程科学, 2009, 11(12): 69-76.

YANG Bing, XIAO Gangzhi. Treatment Techniques for Karst Disaster of Malujing Tunnel on Yichang-Wanzhou Railway [J]. Engineering Science, 2009, 11(12): 69-76.

[7] 曹校勇, 张龙, 林永锋. 羊桥坝隧道大型干溶洞处理方案研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 185-190.

CAO Xiaoyong, ZHANG Long, LIN Yongfeng. Study of the Treatment Scheme for a Large, Dry Karst Cave in the Yangqiaoba Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 185-190.

[8] 中铁二院工程集团有限责任公司. 改建铁路重庆至贵阳线扩能改造工程羊角一号隧道横洞工区 D1K112+239~D1K112+537 段溶洞处理变更设计[Z]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2016.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. The Change Design of Cave at D1K112-D1K112+537 of Yangjiao No. 1 Tunnel of Expansion and Renovation Projects of Chongqing-Guiyang Railway Line [Z]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2016.

[9] 杨昌宇. 岩溶地区隧道设计的几点思考及建议[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 90-93.

YANG Changyu. Some Opinions and Suggestions on Tunnel Design in Karst Areas [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 90-93.

(编辑:刘会娟 白雪)