

文章编号: 1674—8247(2023)04—0108—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 04. 020

# 高速铁路隧道穿越大型溶洞勘察及工程整治技术

王青川<sup>1</sup> 刘科<sup>2</sup> 刘雄伟<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 中铁二院成都勘察设计院有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**郑万高速铁路是国家“八纵八横”快速客运通道的重要组成部分,沿线地形地质极其复杂,隧道通过岩溶发育地段长,岩溶及岩溶水对工程影响大。湖北段荣家湾隧道工程勘察、岩溶补充勘察及整治过程中,采取测绘、测量、钻探、物探、试验等手段,充分利用各阶段勘察成果,深入分析隧道岩溶、岩溶水发育特征,综合开展溶洞大厅稳定性的影响评价,是隧道工程设计及岩溶整治的地质基础保障。研究成果可为复杂岩溶地区隧道岩溶勘察及相关设计提供工程借鉴和参考。

**关键词:**高速铁路;隧道;岩溶;勘察;整治

**中图分类号:** U452.1 **文献标志码:** A

## Investigation and Engineering Renovation Technology of High-speed Railway Tunnel Crossing Large Karst Cave

WANG Qingchuan<sup>1</sup> LIU Ke<sup>2</sup> LIU Xiongwei<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

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

**Abstract:** Zhengzhou-Wanzhou High-speed Railway is an important part of the national fast passenger corridor “Eight North-South and Eight East-West Corridors”. The topographical and geological conditions along the line are extremely complex, and the tunnels pass through long karst-developed areas, thus karst and karst water has a great impact on the project. During the investigation, design, supplementary karst investigation, and treatment process of the Rongjiawan Tunnel Project in Hubei Province, various methods such as mapping, surveying, drilling, geophysical prospecting, and testing were employed. The results of each investigation stage were fully utilized to analyze the characteristics of tunnel karst and karst water development in depth. A comprehensive impact assessment on the stability of karst cave halls was also carried out. This ensures that the geological foundation is secure for both tunnel engineering design and karst treatment. The results can provide engineering references for karst investigation and relevant design of tunnels in complex karst areas.

**Key words:** high-speed railway; tunnel; karst; investigation; regulation

郑万铁路湖北境内沿线河谷深切,山坡陡峻,沿线岩溶、岩溶水文地质问题突出。鉴于岩溶的复杂性、

随机性、隐蔽性,既有岩溶勘察方法虽多,但完全查明岩溶的空间分布形态及发育规律仍是高速铁路工程

收稿日期:2022-07-14

作者简介:王青川(1971-),男,高级工程师。

引文格式:王青川,刘科,刘雄伟. 高速铁路隧道穿越大型溶洞勘察及工程整治技术[J]. 高速铁路技术,2023,14(4):108-114.

WANG Qingchuan, LIU Ke, LIU Xiongwei. Investigation and Engineering Renovation Technology of High-speed Railway Tunnel Crossing Large Karst Cave [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4):108-114.

建设中的世界性难题。目前国内外对岩溶区高速铁路选线还未形成系统的选线理论体系,也未从减灾选线的角度研究岩溶区高速铁路地质选线原则<sup>[1]</sup>。

荣家湾隧道是新建郑州至万州铁路的Ⅰ级风险管理隧道之一,隧道全长6 625 m。隧址区位于长江北岸支流—神龙溪右岸,区内岩性多为三叠系 $T_1j^3$ 灰岩夹白云质灰岩、盐溶角砾岩及 $T_2b^1$ 泥质灰岩、泥灰岩夹泥岩。地表有岩溶洼地、落水洞、溶沟、溶槽、岩溶塌陷等岩溶形态,具有较典型的喀斯特地区地貌特征,区内岩溶发育程度强烈。在勘察设计阶段,遵循岩溶地区线路方案选择原则<sup>[2]</sup>,采用复杂岩溶区高速铁路减灾选线理念<sup>[3]</sup>,综合分析研究了北线(靠河)、南线、南线拔高三大线路方案。在利用综合勘察手段对区域内岩溶、岩溶水进行充分研究评价后,结合隧道前后车站、桥梁工程及其他不良地质对线路的影响情况,贯彻“绕避、抬高、靠河、顺排”岩溶地区选线方针,最终采用南线方案。隧道工程地质条件复杂,隧道通过可溶岩地层长5 900 m。目前隧道已安全贯通,在岩溶发育程度强烈区地质选线取得成功。在隧道施工过程中,揭示较大溶洞(群)多达47处,有岩溶大厅、半充填溶洞、全充填溶洞、溶蚀裂隙、洞穴通道、早期暗河等岩溶形态。其中DK 622+174岩溶大厅跨度达130 m<sup>[4]</sup>,上部空腔高度达20 m,下部充填压缩性高、承载力低的黏土层厚达18 m。在地质补充查明隧底溶洞分布特征及充填物成分等资料的基础上,隧道采用混凝土换填、桩—筏板基础、护墙及支护结构加强等岩溶整治加固措施,保证了隧道结构的稳定性。本文就荣家湾隧道揭示的岩溶不良地质的勘察情况进行分析,并提出相应整治措施。

## 1 工程概况

### 1.1 隧道概况

荣家湾隧道为双线隧道,全长6 625 m,起讫里程为DK 621+620~DK 628+245,最大埋深285.6 m。隧道采用3‰、30‰单面上坡,线路右侧35 m设置平导(对应正洞DK 621+620~DK 626+140)。

### 1.2 自然地理特征

荣家湾隧道地处鄂西神农架林区南部巴东县沿渡河镇舒家槽村、童家坪村,属构造侵蚀剥蚀低山、岩溶槽谷地貌区。隧道洞身段地形总体较缓,沟槽相间出现,区内主要发育矮屋槽—鱼腥洞、舒家槽、万人坑—燕子洞三条岩溶槽谷<sup>[5]</sup>。地面高程110~650 m,相对高差50~245 m,坡度10°~70°,局部陡崖。

区内属亚热带季风气候区,具有平均气温高、空气湿润、雨量充沛、四季分明、冬冷夏热等特点。隧址处于鄂西暴雨中心范围,据资料统计,区内具有降雨连续集中、7月份雨量特别丰富、年际变化大等特点。每年4—9月为雨季,其降雨量占全年平均降雨量的77.8%。隧道洞身沿线均有公路并行,隧道进、出口均有公路相通,交通方便。

### 1.3 地层岩性及地质构造

荣家湾隧道洞身从进口到出口依次穿越的地层为三叠系下统嘉陵江组三段( $T_1j^3$ )、中统巴东组一段( $T_2b^1$ )与二段( $T_2b^2$ ),岩性主要有灰岩、白云质灰岩、盐溶角砾岩、泥质灰岩、泥灰岩、泥岩、砂岩等,岩性较复杂。

荣家湾隧道位于扬子准地台一级构造单元西缘,上扬子南部被动边缘折冲带之八面山台坪褶皱带内,隧道南侧可见一小型熊家槽正断层,区域性深大断裂龚家桥断裂从隧道南东侧经过,北南部各发育一小(袁家槽背斜)一大(横石溪背斜)背斜构造。隧道位于横石溪背斜北翼,地层走向为近东西向,隧道走向与地层走向近于平行,倾角一般28°~45°。DK 622+174大型溶洞段为单斜构造,岩性为厚层状灰岩,洞内测得岩层产状为 $N80^\circ\sim 85^\circ W/30^\circ\sim 35^\circ S$ 、主要节理为 $N80^\circ W/70^\circ N$ 、 $N10^\circ W/82^\circ N$ 。

### 1.4 水文地质特征

隧道地下水为松散堆积层孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水3类。其中岩溶水以管道水为主,溶隙裂隙水多以泉点形式出露地表,流量随季节变化大,冬季流量小甚至枯竭,地下水位变化大。

勘察期间地质调绘发现,在隧道的南北侧均发育1条岩溶管道,北侧约200 m为矮屋槽—鱼腥洞暗河,南侧约1100 m为万人坑—燕子洞暗河。隧道进口段周边分布4处暗河出口及岩溶泉点,如表1所示。

据调查及钻探揭示,在隧道中部及出口段地下水位埋深一般低于轨面标高10~30 m,由此推测出隧道方向上地下水水力坡度为3%~7%,与由万人坑—燕子洞暗河上下游出露点标高推测暗河的纵坡坡度基本吻合。据此坡度对矮屋槽—鱼腥洞暗河位置进行推测,隧道位置高于暗河50 m以上,如图1所示。根据暗河、大型溶洞对应关系,可以看出本溶洞水文地质条件受矮屋槽—鱼腥洞暗河影响更大。

根据区域岩溶水排泄基准面分析,隧道洞身可溶岩段主要位于垂直渗流带,采用地下水径流模数计算预测隧道最大涌水量为 $Q_{\max}=13\text{万 m}^3/\text{d}$ 。

表 1 荣家湾隧道大型溶洞周边泉点、暗河特征一览表

编号	地理位置	地貌位置	构造部位	出露高程/m	流量 L/s	出露层位	开发利用情况	调查日期
SD1 (鱼腥洞)	DK 621 + 500 右侧 约 100 m 处	陡壁下方	横石溪背斜北翼	120	—	灰岩 (T <sub>1j</sub> <sup>3</sup> )	已被三峡水库淹没	2014 -08 -01
S53 (燕子洞)	D1K 623 + 000 左侧 1 000 m 处	岩壁溶洞	横石溪背斜北翼	146	12.9	灰岩 (T <sub>1j</sub> <sup>3</sup> )	自由排放	2014 -08 -01
S52 (“大水井”)	DK 622 + 530 左侧 195 m	斜坡中部	横石溪背斜北翼	350	0.5	灰岩 (T <sub>1j</sub> <sup>3</sup> )	引入蓄水池供周围 9 户居民生活用水	2014 -08 -01
DSH-62-2	D1K 626 + 050 右侧 约 490 m 处	斜坡中部	横石溪背斜北翼	436	—	灰岩 (T <sub>1j</sub> <sup>3</sup> )	引入蓄水池供周围 18 户居民生活用水	2015 -04 -21

施工中揭示地下水大部分为上层滞水,局部为早期岩溶洞穴被淤积一定厚度的黏土层后汇集一定的地下水静储量。隧道贯通后,地下水径流环境发生改

变,在雨季时随大量地表水入渗形成丰富的过路水,可能会疏通早期被堵塞的岩溶裂隙或管道,发生较大的涌水或形成较大水压,对隧道结构产生危害。

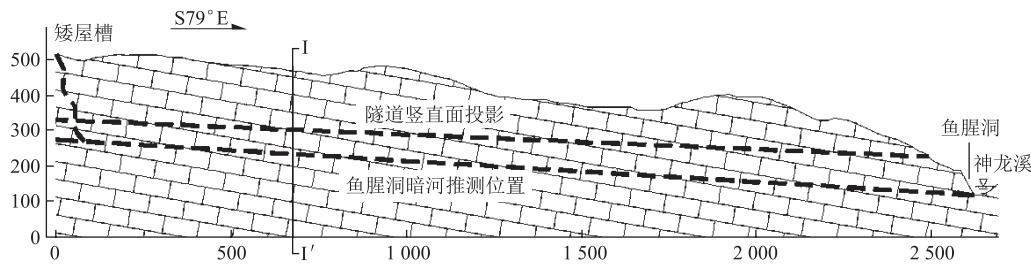


图 1 鱼腥洞暗河与隧道位置关系示意图(m)

2 岩溶大厅勘察及评价

2.1 岩溶大厅勘察

荣家湾隧道进口平导施工至 PDK 622 + 172 时,于掌子面左侧拱脚揭示岩溶大厅,溶洞往线左方向(正洞方向)发育,溶洞为半充填型溶洞,上半部分为空洞,下部为洞穴堆积充填物。溶洞底部高差起伏,充填黏土潮湿,未见洞底流水;溶腔内钟乳石、石芽、石笋、石幔发育,溶洞中间发育底部直径约 7.1 m 的钟乳石柱,石柱向上逐渐变小,洞周小溶腔发育,无新鲜空气。

经测量,溶洞走向 N50° ~ 65° W,与岩层走向近似平行,洞径 70 ~ 100 m,高 8 ~ 20 m,影响平导 PDK 622 + 173 ~ + 198 段、正洞 DK 622 + 130 ~ DK 622 + 200 段,如图 2 所示。溶洞在平面上呈纺锤形,两头较大,中间连接通道窄。在垂直方向上,该溶洞可分为上下 2 层,下层溶洞填充物顶面较为平坦,高程 275 ~ 276 m,空洞高 11 ~ 15 m,上层溶洞填充物顶面有一定起伏,高程 281 ~ 283 m,空洞高 3 ~ 9 m,如图 3 所示。

经勘探揭示,溶洞底部充填物以软塑状黏土为主,局部见块石堆积。下层溶洞充填物厚 10 ~ 18 m,其中在黏土中分布 2 ~ 11 m 厚的碳酸钙沉积物(钙

板);上层溶洞充填物厚 7 ~ 10 m。

2.2 岩溶大厅稳定性评价

2.2.1 洞穴堆积物稳定性评价

该溶洞洞穴堆积物主要为碳酸钙沉积物、黏土沉积物。碳酸钙沉积物主要以化学沉积为主,本溶洞内碳酸钙沉积物极为发育,类型多样、形态各异,包括发育在洞顶的钟乳石、洞周的石幔、洞底的石笋以及石柱、钙板等。碳酸钙沉积物具有多孔、性脆、强度低的特点,施工爆破震动使多处钟乳石断裂塌落,碳酸钙沉积物不能作为建筑物基础。

根据钻探资料分析,溶洞底黏土沉积物厚 10 ~ 18 m,局部夹有早期洞顶坍塌形成的块石。而黏土具有含水量高、承载力低、压缩性高、弱 ~ 中等膨胀的特点。根据洞内轻型动探揭示,本层黏土表层 1 m 范围内基本承载力 50 ~ 60 kPa,其下基本承载力为 80 ~ 100 kPa。黏土稳定性差,在具有一定边坡高度或临空面时易发生失稳。

由于在调查和勘探过程中未见地下水发育,仅在溶洞揭示初期发现溶洞洞壁较潮湿,未见地下水冲刷现象,说明本溶洞未揭示时是一个较为封闭的岩溶系统,溶洞填充物流失的可能性较小。但在隧道开挖改变其封闭状态后,地下水径流环境会逐渐发生变化,雨季时可能因地下水较丰富引起物质流失,对隧道结



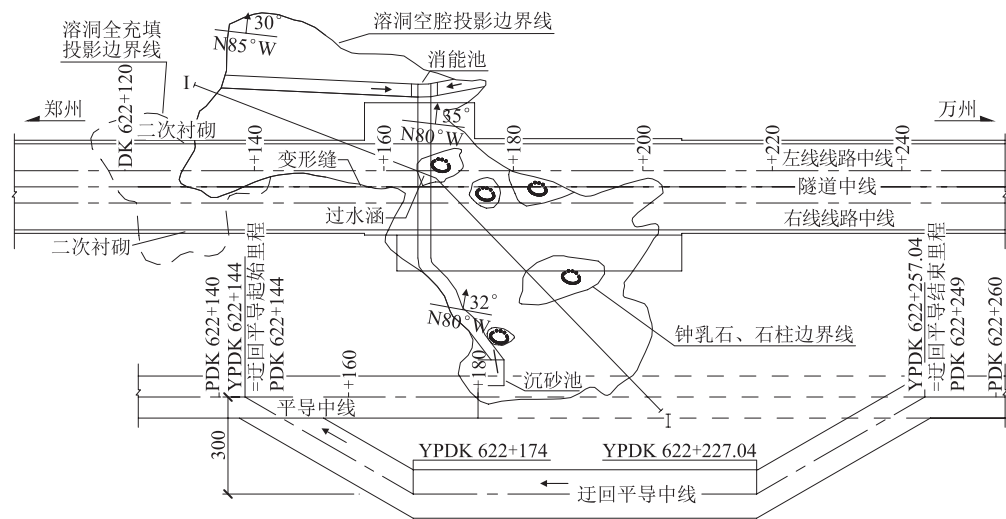


图 2 溶洞平面投影示意图及与线位关系图(m)

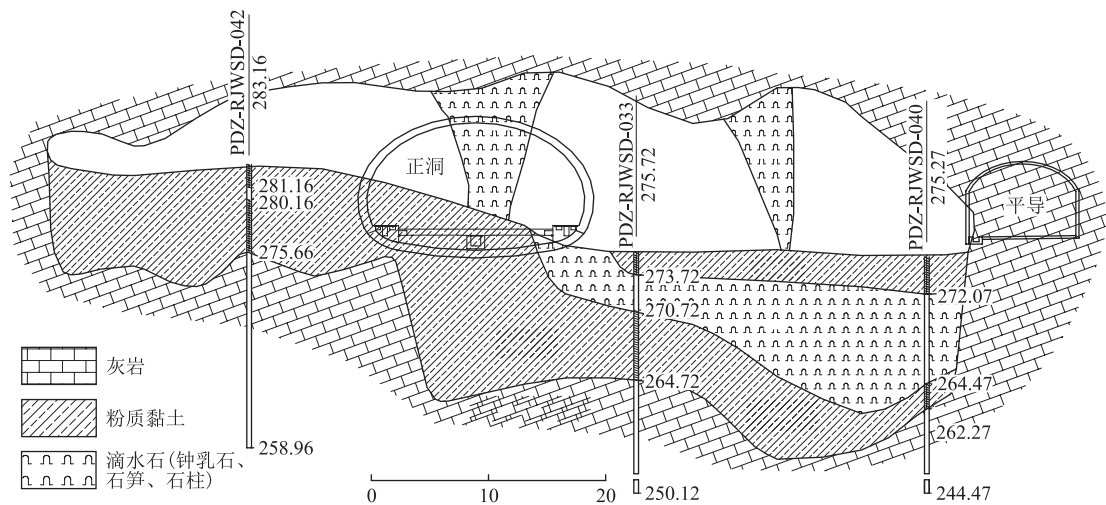


图 3 I-I' 溶洞纵向剖面示意图(m)

构产生危害。

2.2.2 洞穴顶板稳定性评价

根据现场调查,该溶洞顶板除去碳酸钙沉积物后为完整~较完整厚~巨厚层状灰岩,岩层主控产状 N85° W/30° S、主控节理为 N80° W/70° N、N10° W/82° N。下层溶洞顶面近水平或局部往线路左侧微倾,上层溶洞顶板大部分为灰岩层面,顶面与层面产状近于一致,倾向右侧,倾角约 30°。洞壁基本为厚薄不均的碳酸钙沉积物覆盖,未见较为新鲜结构面。

根据勘察资料,溶洞大厅岩线路长度约 50 m,溶洞埋深 77 ~ 92 m,地表基岩裸露,溶洞大厅顶板跨径比最小约为 1.54。根据溶洞顶板岩层强度、完整性、不利结构面、跨径比等因素综合分析,本溶洞顶板整体处于稳定状态,不会发生大规模溶洞顶板坍塌。在施工爆破震动影响时,仅局部存在受结构面切割形成的表层结构体发生小型掉块,或局部表层碳酸钙沉积物发生剥落。

2.3 岩溶水评价

施工揭示溶洞时未发现有溶洞流水、集水、突水情况,溶洞底部钻孔也未测试有地下水位。经 3 个水文年<sup>[6]</sup>的监测,未发现有涌水突水现象,仅少量岩溶裂隙水出露。根据地质调绘、隧道开挖、洞底钻探以及溶洞所处位置综合分析,岩溶大厅段位于岩溶垂直循环带,与原勘察资料吻合,主要以地表入渗和岩溶管道过路水为主。

3 岩溶大厅整治方案设计

由于岩溶发育具有隐蔽性、不均一性、无规律性的特点,岩溶洞穴的空间形态、充填情况以及岩溶水的分布等极为复杂。为确保“隧道结构、施工及运营

安全”,根据荣家湾隧道 DK 622 + 116 ~ DK 622 + 206 段开挖揭示地质及补勘地质情况,对平导 PDK 622 + 144 ~ + 249 段进行绕行,正洞分别采用混凝土换填、桩-筏板基础、护墙及支护结构加强等措施,并在岩溶整治施工过程中,进一步核实修正溶洞边界条件,“因地制宜”不断完善整治措施<sup>[7]</sup>。

### 3.1 平导

为避免影响现场施工,同时为溶洞勘察提供时间及空间,于平导中线右侧 15 m 设置迂回平导,起讫里程 YPDK 622 + 144 ~ 257.04(对应平导里程 PDK 622 + 144 ~ + 249),全长 113.04 m,坡度为 1.67%,采用无轨双车道断面,内净空尺寸为 7.5 m(宽)×6.2 m(高)。

### 3.2 溶腔防护

溶腔壁采用锚网喷处理。锚网喷前先清除溶腔壁浮渣及碳酸钙沉积物,换填段换填面以上溶洞壁及桩-筏板结构段筏板底以上溶洞壁采用锚网喷防护,锚杆采用  $\phi 22$  砂浆锚杆,4.0 m/根,1.2 m×1.2 m 梅花型布置, $\phi 8$  钢筋网,网格间距 25 cm×25 cm,喷 C25 混凝土,厚 8 cm。

### 3.3 正洞结构

#### 3.3.1 基底处理

由于高速铁路无砟轨道对隧底变形控制要求极为严格,基底采取换填或桩-筏板结构处理<sup>[8]</sup>。DK 622+116~+138、DK 622+157~+206 段基底设置桩-筏板结构,采用钻孔桩,桩径 1.5 m,桩长 9~19.5 m,桩横向间距 5 m,纵向间距 4.5 m;2 段分别设整体式筏板,筏板高 1.5 m,宽 13.1~26 m。DK 622+138~+157 段溶洞充填物进行全部清除,采用 C25 混凝土回填,回填高度与正洞侧沟齐平,如图 4、图 5 所示。

#### 3.3.2 衬砌及支护

(1)衬砌结构:DK 622+116~+138 段采用 VD 型衬砌;DK 622+138~DK 622+157 段采用 VC 型复合式衬砌;DK 622+157~DK 622+206 段采用 VE 型加强复合式衬砌。

(2)C25 混凝土护墙:DK 622+136~DK 622+206 段衬砌露空部位施做 C25 混凝土护墙,护墙按最少 3 m 厚控制,胸坡 1:0.25,顶部至溶腔壁,护墙与换填面之间设置高 20 cm,宽 80 cm 的榫口。

(3)超前支护:DK 622+162~DK 622+174 段取消初期支护及超前支护;其余段落超前支护均采用拱部  $\phi 42$  小导管,环向间距 0.4 m,纵向间距 2.4 m,每根长 4 m,取消位于溶腔部位初期支护系统锚杆及

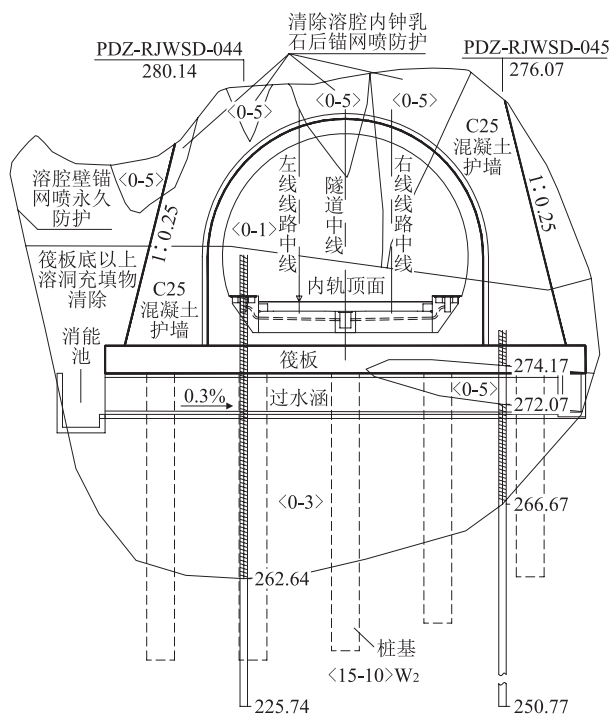


图4 桩-筏板基础典型横断面图(m)

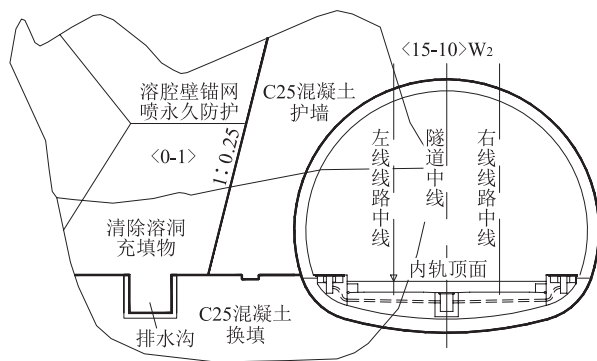


图5 溶洞范围隧道基础换填典型横断面示意图

超前小导管。

(4)加强支护:DK 622+116~+138 段采用拱墙 I22a 钢架,钢架间距 0.6 m/榀;结合隧底桩筏结构,将拱墙钢架延伸至筏板基础底部;DK 622+116~+122 段边墙脚及筏板底钢架位于基岩位置时,锁脚锚杆采用  $\phi 42$  钢花管,长 4.5 m。DK 622+122~138 段边墙脚及筏板底钢架位于充填溶洞时,将钢架锁脚锚管设于溶洞边界与钢架相交处,并至少高于溶洞壁 2 m,锁脚锚管采用 2 根  $\phi 76$  钢花管,长 6 m,其中 DK 622+122~+130 初期支护已完成段采用以上措施对锁脚进行加强;DK 622+122~138 段拱墙在基岩范围内沿钢架增设径向锚杆,锚杆采用  $\phi 22$  组合中空注浆锚杆,长 8 m,环向间距 2 m,纵向间距参照钢架间距设置,要求锚杆垫板与钢架固定牢靠。

DK 622 + 130 ~ DK 622 + 157 段采用全环 I22a 型钢钢架,钢架间距 0.6 m。DK 622 + 157 ~ DK 622 + 162、DK 622 + 174 ~ DK 622 + 206 段拱墙采用 I22a 钢架,钢架间距 0.6 m。

(5) 施工方法:DK 622 + 116 ~ DK 622 + 162、DK 622 + 174 ~ DK 622 + 206 段采用三台阶法开挖,DK 622 + 162 ~ DK 622 + 174 段采用明挖法开挖。

### 3.3.3 防水排水

#### (1) 地下水引排

考虑地下水发育的不确定性<sup>[9]</sup>,为便于地下水引排及运营期间维护,于 DK 622 + 166.25 处隧道筏板结构底设置过水涵,两侧均设置排水沟。地下水经过水涵排入平导,再经平导排出洞外,汇入原设计排水设施。

#### (2) 衬砌防水

本隧道防水标准为一级,隧道二次衬砌采用防水混凝土,明洞衬砌外缘设沥青 + 1.5 mm EVA 防水板 + 水泥砂浆保护层,纵向施工缝采用“橡胶止水条 + 中埋钢板止水带”防水措施;环向施工缝采用“外贴橡胶止水带 + 中埋钢板止水带”并全环增设凸壳型排水板防水措施,排水板宽 1 m。

#### (3) 衬砌排水

衬砌背后设置环向、纵向盲沟,洞内设置双侧排水沟加中心水沟;衬砌背后设置纵环向盲沟,直接弯入侧沟。隧道衬砌两侧边墙外,对应于水沟水面以上 5 cm 的高度位置,设置  $\phi 150$  纵向盲沟;隧道衬砌拱墙范围,设置  $\phi 50$  环向盲沟。设置光面型防水板地段,间距 4 m;设置立体型防水板地段,可根据需要少设或不设。两侧沟与中心沟通过横向导水管连接,导水管采用  $\phi 100$  PVC 管,按间距 30 m 设计。

#### (4) 变形缝

结合本段溶洞发育的规模、形态及结构处理措施,本段分别于 DK 622 + 116、DK 622 + 138、DK 622 + 157、DK 622 + 206 处设置变形缝。变形缝全环采取“外贴橡胶止水带 + 中埋钢边橡胶止水带 + 内缘聚硫密封膏嵌缝 + 缝间聚乙烯硬质泡沫塑料板填充”防水措施。

## 4 岩溶整治效果评价

施工单位严格按照岩溶整治设计图纸,完成了清除溶腔内钟乳石、溶腔壁锚网喷、清除溶洞充填物、钻孔桩、过水涵、筏板、护墙、掌子面开挖、初期支护、基底换填、护墙、防排水及二衬等综合岩溶整治工程措施,施工过程安全顺利。郑万高速铁路全线通车后,

经 2 年多的监测,衬砌表面无水渍、裂纹,地下水排泄通畅,无砟轨道运营正常,岩溶整治效果良好。

## 5 结论

本文以郑万高速铁路荣家湾隧道穿越岩溶不良地质为背景,探讨了高速铁路隧道穿越岩溶大厅的勘察技术、岩溶稳定性评价及对应整治措施,得出主要结论如下:

(1) 勘察设计阶段利用综合勘察手段坚持“地质选线、减灾选线”原则确定隧道平纵面,可最大程度减少岩溶及岩溶水对隧道的不良影响。

(2) 长大隧道在岩溶发育程度强烈区域设置平导可灵活调整施工组织方案,对施工地质勘察、隧道施工安全及工期保障均有积极作用。

(3) 由于岩溶发育的不均一性、无规律性,在隧道施工阶段加强岩溶施工勘察,确保隧道岩溶整治安全可靠。

## 参考文献:

- [1] 蒋良文,许佑顶,许模. 高速铁路复杂岩溶地质勘察与灾害防治 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
JIANG Liangwen, XU Youding, XU Mo. Geological Survey and Disaster Prevention of Complex Karst in High-speed Railway [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 铁道部第二勘测设计院. 岩溶工程地质 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.  
The Second Survey Design Institute of Ministry of Railways. Karst Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [3] 王子江,蒋良文,王茂靖,等. 复杂岩溶区高速铁路减灾选线理论研究 [J]. 铁道工程学报, 2018, 35(4): 11 - 15.  
WANG Zijiang, JIANG Liangwen, WANG Maojing, et al. Theoretical Study on Disaster Reduction and Route Selection of High-speed Railway in Complex Karst Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 11 - 15.
- [4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 荣家湾隧道 DK 622+130 ~ DK 622+210 溶洞地质勘察报告 [R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Rongjiawan Tunnel DK 622+130 ~ DK 622+210 Karst Cave Geological Investigation Report [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建铁路郑州至万州线河南、湖北省界至万州段可行性研究 1: 50000 区域水文地质调查报告 (CK622 ~ CK636 巴东舒家槽隧道段) [R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2014.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Feasibility Study of Henan and Hubei Provincial Boundary to Wanzhou Section



- of Zhengzhou-Wanzhou Railway 1 : 50000 Regional Hydrogeological Survey Report ( CK 622 ~ CK 636 Badong Shujiacao Tunnel Section ) [ R ]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. , 2014.
- [6] TB 10027 - 2022 铁路工程不良地质勘察规程 [ S ].  
TB 10027 - 2022 Code for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering [ S ].
- [7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建铁路郑州至万州线河南、湖北省界至万州段荣家湾隧道 DK 622+116 ~ +206 段岩溶整治变更设计 [ Z ]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2019.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. Karst Remediation Modification Design of Rongjiawan Tunnel Section DK 622+116 ~ + 206 from Henan and Hubei Provincial Boundary to Wanzhou of Zhengzhou-Wanzhou Railway [ Z ]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. , 2019.
- [8] 周关学,冯涛,曾诚. 安六铁路六枝向斜隧道涌水分析及整治方案研究 [ J ]. 高速铁路技术, 2020, 11 (3): 85 - 90.  
ZHOU Guanxue, FENG Tao, ZENG Cheng. Study on Water Gushing Analysis and Remediation Scheme of Liuzhi Syncline Tunnel on Anshun-Liupanshui Railway [ J ]. High Speed Railway Technology, 2020, 11 (3): 85 - 90.
- [9] TB 10003 - 2016 铁路隧道设计规范 [ S ].  
TB 10003 - 2016 Code for Design of Railway Tunnel [ S ].
- ~~~~~
- (上接第 94 页)
- [ J ]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138 (11): 1396 - 1402.
- [12] 乔瑞军. 客运专线车站接发车进路选择与调整问题研究 [ D ]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
QIAO Ruijun. Research on Selection and Adjustment of Receiving Routes and Dispatching Routes in Passenger Dedicated Line Station [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [13] 何林,吕红霞. 高速铁路车站到发线运用优化研究 [ J ]. 铁道运输与经济, 2012, 34 (8): 47 - 50, 66.  
HE Lin, LV Hongxia. Research on Optimization of Arrival-departure Track Using in High-speed Railway Stations [ J ]. Railway Transport and Economy, 2012, 34 (8): 47 - 50, 66.
- [14] 林志安,潘玲巧. 铁路客运站到发线分配问题研究 [ J ]. 铁道运输与经济, 2010, 32 (10): 58 - 61.  
LIN Zhian, PAN Lingqiao. Study on Allocation of Receiving & Departure Lines in Passenger Stations [ J ]. Railway Transport and Economy, 2010, 32 (10): 58 - 61.
- [15] ZWANEVELD P J, KROONLG, ROMIJNHE, et al. Routing Trains through Railway Stations: Model Formulation and Algorithms [ J ]. Transportation Science, 1996, 30 (3): 181 - 194.
- [16] 刘源,牛慧兰,张鑫,等. 高铁站到发线运用模型与算法 [ J ]. 现代交通技术, 2015, 12 (2): 69 - 73.  
LIU Yuan, NIU Huilan, ZHANG Xin, et al. Model and Algorithm for Arrival-departure Track Utilization at High-speed Railway Station [ J ]. Modern Transportation Technology, 2015, 12 (2): 69 - 73.
- [17] 刘杰,殷勇,甘志良. 高速铁路车站咽喉区与到发线综合运用优化 [ J ]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18 (1): 193 - 199.  
LIU Jie, YIN Yong, GAN Zhiliang. Comprehensive Optimization for Utilization of Arrival-departure Tracks and Throat Area in High-speed Railway Station [ J ]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18 (1): 193 - 199.
- [18] 甘志良. 高速铁路车站咽喉区与到发线综合运用优化 [ D ]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
GAN Zhiliang. Comprehensive Optimization for Utilization of Arrival-departure Tracks and Throat area in High-speed Railway Station [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [19] 陈韬,倪少权,黄强,等. 高速铁路客运站高峰时段最大通过能力计算模型及算法 [ J ]. 中国铁道科学, 2015, 36 (6): 128 - 134.  
CHEN Tao, NI Shaoquan, HUANG Qiang, et al. Model and Algorithm for Maximum Carrying Capacity of High-speed Railway Passenger Station during Peak Hours [ J ]. China Railway Science, 2015, 36 (6): 128 - 134.
- [20] 陈彦,史峰,秦进,等. 旅客列车过站径路优化模型与算法 [ J ]. 中国铁道科学, 2010, 31 (2): 101 - 107.  
CHEN Yan, SHI Feng, QIN Jin, et al. Optimization Model and Algorithm for Routing Passenger Trains through a Railway Station [ J ]. China Railway Science, 2010, 31 (2): 101 - 107.
- [21] 吴鹏,寇玮华,许木南. 基于分支定界法的客运站到发线运用优化研究 [ J ]. 交通运输工程与信息学报, 2016, 14 (4): 100 - 104, 118.  
WU Peng, KOU Weihua, XU Munan. Optimization of Arrival-departure Lines in Passenger Station Based on Branch and Bound Method [ J ]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016, 14 (4): 100 - 104, 118.
- [22] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用 [ D ]. 长春: 吉林大学, 2006.  
PANG Feng. The Principle of SA Algorithm and Algorithm's Application on Optimization Problem [ D ]. Changchun: Jilin University, 2006.