

文章编号: 1674—8247(2020)03—0085—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.018

# 安六铁路六枝向斜隧道涌水分析及整治方案研究

周关学 冯 涛 曾 诚

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**安六铁路岩脚至六枝南段穿越六枝向斜,长约 14.07 km,该段岩脚、对门寨、大用、地宗等隧道施工中均出现较大的涌水,对铁路施工造成较大影响,且可能会为铁路后续运营留下较大的安全隐患。本文从工程地质特征和水文地质特征两个方面对其地质机理进行研究,开展了工程地质及水文地质调查,提出了建议综合封闭洼地法、溶腔壁地下水位线痕迹法、井泉补给法及隧道内溶洞涌水量观测等多种方法来预测隧道涌水量,同时提出了在隧道来水侧设置泄水洞,并于泄水洞与正洞出水点设置集水廊道的涌水整治方案,确保隧道衬砌结构及后期铁路运营的安全。

**关键词:**安六铁路;六枝向斜;试验研究;涌水分析;涌水量计算;整治措施

**中图分类号:**U453.6<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A

## Study on Water Gushing Analysis and Remediation Scheme of Liuzhi Syncline Tunnel on Anshun-Liupanshui Railway

ZHOU Guanxue FENG Tao ZENG Cheng

(China Railway ErYuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Yanjiao-Liuzhi southern section of Anshun-Liupanshui railway passes through the syncline geology area in Liuzhi, with a length of about 14.07 km. In this section, the large water gushing occurred in the construction of such tunnels as Yanjiao, Duimenzhai, Dayong and Dizong, which affected the railway construction seriously, and may leave great potential safety problems for the subsequent operation of the railway. This paper studies the geological mechanism from engineering geological and hydrogeological characteristics, carries out engineering geological and hydrogeological investigation, and puts forward the engineering methods to predict tunnel water inflow, such as comprehensive closed depression method, karst cavity wall groundwater level trace method, well spring supply method and observation of karst cave water inflow in the tunnel, and puts forward a water gushing treatment scheme that is to set up a drain tunnel on the water inflowing side of the tunnel and the water collecting galleries at the gushing points of the drain tunnel and the main tunnel, so as to ensure the safety of tunnel lining structure and later railway operation.

**Key words:** Anshun-Liupanshui railway; Liuzhi syncline; experimental studies; water gushing analysis; calculation of water inflow; remediation measures

### 1 研究背景

隧道涌水是隧道施工过程中,围岩含水层的地下水在水头压力和其他压力的综合作用下,克服隔水层、

断层以及裂隙等阻力,以突然方式从隧道洞室周边涌入坑道内的工程地质现象,是岩溶地区常见的地质灾害<sup>[1]</sup>。岩溶隧道的涌水与地下岩溶管道和岩溶水发育程度密切相关,还突出表现为受地质构造和地貌的

收稿日期:2019-06-04

作者简介:周关学(1966-),男,高级工程师。

引文格式: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(2):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(2):85-90.

控制,如位于褶曲轴部的碳酸盐岩,岩溶发育强度更甚于翼部,而褶曲翼部,不论向斜、背斜,如存在排泄基准面,则接近排泄基准面的部位,往往富有较为丰富的岩溶水<sup>[2]</sup>。地质勘察中要充分分析水文地质条件,采用多种方法准确预测隧道涌水量。线路选线应避开岩溶水富集地带,尽量拔高线路标高,隧道纵坡采用人字坡。

2 工程概况

2.1 工程概况

安六铁路东接沪昆客运专线安顺西站,向西经六盘水市的六枝特区,于六盘水枢纽水城站接轨,后利用既有沪昆铁路至六盘水站,运营长度 124.65 km,设计速度 250 km/h,是六盘水市至贵阳市的快速通道。其中岩脚至六枝南段约 14.068 km,穿越六枝向斜,设置主要工程有岩脚隧道(2 407 m)、对门寨隧道(1 756 m)、大用隧道(2 160 m)、地宗隧道(3 045 m)、苏家寨大桥(395 m)、上波帕大桥(468 m)、下波帕大桥(442 m)、上波帕大桥(395 m)、下玉黑大桥(764 m)、龙潭大桥(503 m)等,桥隧总长 13 125 m,桥隧比 93.30%,隧道最大埋深约 135 m,桥梁最大墩高 44 m。

2.2 工程地质特征

2.2.1 地层岩性

本段线路主要穿过三叠系(T)和二叠系(P)地层,六枝向斜轴部主要为法郎组(T<sub>2f</sub>)、关岭组(T<sub>2g</sub>)地层,两翼主要为永宁镇组(T<sub>1yn</sub>)、夜郎组(T<sub>1y</sub>)、大冶组(T<sub>1d</sub>)、大隆组(P<sub>2d</sub>)、长兴组(P<sub>2c</sub>)、龙潭组(P<sub>2l</sub>)、峨眉山玄武岩组(P<sub>2β</sub>)等地层。地表覆盖第四系全新统(Q<sub>4</sub>)黏土层。其岩性特征如表 1 所示。

表 1 线路通过主要地层岩性特征表

系	统	地层名称	地层代号	主要岩性
第四系	全新统	-	Q <sub>4</sub>	褐黄色硬塑状黏土层
三叠系	上统	法郎组	T <sub>2f</sub>	灰岩夹泥灰岩及白云岩,隧道涌水地层
		关岭组三段	T <sub>2g</sub> <sup>3</sup>	灰至灰白色中厚层隐晶质白云岩及白云质灰岩
		关岭组二段	T <sub>2g</sub> <sup>2</sup>	灰色隐晶质中厚层灰岩夹白云质灰岩
		关岭组一段	T <sub>2g</sub> <sup>1</sup>	色杂的页岩、泥岩与泥质白云岩交互成层
	下统	永宁镇组二段	T <sub>1yn</sub> <sup>2</sup>	白云岩、白云质灰岩夹溶塌角砾岩及石膏层,隧道涌水地层
		永宁镇组一段	T <sub>1yn</sub> <sup>1</sup>	灰岩夹白云质灰岩夹泥灰岩、钙质泥岩、页岩等
		夜郎组	T <sub>1y</sub>	灰岩和砂质泥岩夹粉砂岩、砂岩、页岩及鲕状灰岩
		大冶组	T <sub>1d</sub>	灰岩夹角砾状灰岩和鲕状灰岩及少量泥页岩
二叠系	上统	长兴+大隆+龙潭组	P <sub>2c+d+l</sub>	粉砂岩、细砂岩夹页岩、灰岩、泥灰岩和煤层

2.2.2 地质构造

大地构造属于扬子地台之滇黔鄂台褶皱带,处于南丹-紫云-水城断裂带上,呈 NW-SE 向延伸,位于一系列 NW 和 NE 向紧密全形褶皱和平行褶皱压性冲断层组成的“山”字型构造。六枝向斜北翼岩层产状 N85°W/32°SE,南翼岩层产状 N50°W/55°NE,有 N45°E/90°和 N55°W/90°两组张性节理,在岩溶化作用下形成岩溶裂隙及岩溶管道,控制六枝向斜的地下水流向。

2.3 水文地质特征

2.3.1 区域水文地质条件

测区位于长江水系与珠江水系的分水岭地带,南北两侧分属不同的水文地质单元,地下水分水岭与地表水分水岭基本一致<sup>[3]</sup>。在分水岭北部,地下水流向北及东北方向,排向乌江;在分水岭南部,地下水流向南及南东方向,流经六枝河支流,最后排向北盘江。测区地层岩性、地质构造和地貌控制着地下水流向<sup>[4]</sup>,六枝向斜属于珠江流域北盘江水系,地表水由向斜两翼峰丛向向斜轴部低洼溶蚀槽谷汇流入六枝河,后沿向斜轴部由北西向南东径流,汇入北盘江。地表冲沟发育,轴部溶蚀槽谷内地表水及地下水丰富,水系发达。

2.3.2 岩溶水的补给、径流、排泄

测区属亚热带季风高原高山气候,雨量充沛,多年平均年降雨量 1 487.6 mm,最大日降雨量 206.9 mm,年蒸发量 1 300.8 mm,雨季多集中在 5~8 月,为地下水的补给提供了较为充足的水源。地下水类型为第四系孔隙潜水、基岩裂隙水及岩溶水,岩溶水丰富。地下水由翼部向轴部汇聚,形成较为完整的补给、径流、排泄空间分布。六枝向斜两翼煤系地层为补给区,地表冲沟汇聚了大量地表水,地表水主要靠大气降雨补给,地表沟水在可溶岩与非可溶岩分界线形成断头沟、落水洞<sup>[5]</sup>,地表水以洼地、落水洞、溶腔、裂隙汇入地下岩层,补给地下形成地下水。向斜两翼碳酸盐可溶岩地层为地下水径流区,在新构造应力场的作用下,测区 N45°E/90°、N55°W/90°两组张性节理裂隙处于拉张状态,为地下水储存和运移创造了有利条件,地下水在深部岩溶水以网络状岩溶裂隙管道、暗河等运移<sup>[6]</sup>。向斜轴部溶蚀槽谷为排泄区,地势低洼,为测区的地下水排泄基准面,地下水以下降泉的形式排泄在六枝河内,在六枝河两岸露出了天生桥、下波帕、玉黑达冲、上玉黑、地宗等暗河<sup>[7]</sup>。

3 隧道涌水分析及水量计算

经过水文地质分析,对六枝向斜的岩脚、对门寨、

大用、地宗等隧道的涌水段落进行涌水量计算。

3.1 洼地法

洼地法计算隧道涌水量的公式:

$$Q = F \times X \times (1/T) \times 0.1 \times 0.6 \times \alpha \tag{1}$$

式中: $F$ ——洼地地表汇水面积( $\text{km}^2$ );

$X$ ——测区日最大降雨量( $\text{mm}$ );

$T$ ——洼地等效消水天数( $\text{d}$ );

$\alpha$ ——降雨入渗系数。

各隧道采用参数及涌水量计算结果如表2所示。

表2 洼地法计算隧道涌水量汇总表

隧道名称	洼地地质概况	汇水面积 / $\text{km}^2$	最大降雨 量/ $\text{mm}$	等效消水 天数/ $\text{d}$	降雨入渗 系数	计算涌水量 / $(\text{m}^3/\text{d})$	影响里程段
岩脚 隧道	地表可见封闭洼地、落水洞及断 头地表水沟	2.01	206.9	1	0.6	149 000	DK 31 + 800 ~ DK 32 + 400
对门寨 隧道	地表可见封闭洼地、落水洞及断 头地表水沟	0.55	206.9	1	0.6	41 000	DK 34 + 160 ~ DK 34 + 800
大用 隧道	线路右侧发育溶蚀槽谷、洼地, 落水洞等,洼地呈带状	2.1	206.9	1	0.3	78 200	DK 38 + 390 ~ DK 38 + 900 线路右侧
大用 隧道	线路左侧洼地呈带状,地表见落 水洞、漏斗等	4.4	206.9	1.5	0.3	109 200	DK 38 + 300 ~ DK 38 + 600 线路左侧
地宗 隧道	地表洼地长 200 m,宽 100 m,洼 地上游发育冲沟。	1.2	206.9	1	0.6	88 900	DK 42 + 370 ~ DK 42 + 410
地宗 隧道	地表可见断头沟及溶腔、落水 洞,为暗河入口	0.75	206.9	1	0.6	55 900	DK 43 + 320 ~ DK 43 + 500

3.2 井泉补给法

通过较长时间观测隧道井泉点流量,绘制流量折线图,来预测隧道涌水量的方法叫井泉补给法。

岩脚隧道涌水量计算公式:

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \tag{2}$$

式中: $Q_1$ ——DK 32 + 922 右侧 418 m 泉点流量;

$Q_2$ ——DK 33 + 009 右侧 232 m 泉点流量;

$Q_3$ ——既有岩脚寨隧道进口暗河口流量;

$Q_4$ ——黑晒村大用镇引用水源井点流量。

岩脚隧道地下水排泄到天生桥至黑晒冲沟内,冲沟内发育 4 个井泉点,2016 年 6 月 28 日至 2016 年 6 月 30 日,六枝地区降特大暴雨,经统计,各井泉点最大流量分别为: 27 648  $\text{m}^3/\text{d}$ 、21 168  $\text{m}^3/\text{d}$ 、39 657  $\text{m}^3/\text{d}$ 和 42 163  $\text{m}^3/\text{d}$ ,故预测岩脚隧道出口最大涌水量为 130 636  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

3.3 溶腔壁水位痕迹法

地下水在地下暗河或溶蚀通道内水平流动时,常会在溶腔壁上留下水位痕迹线,隧道开挖会揭示溶腔壁的历史上最高水位痕迹线,根据水位痕迹线与隧道轨面标高的关系,分析判定地下水对隧道影响程度。在对门寨隧道 DK 34 + 120.9 左侧 50 m 和 DK 34 + 404.75 左侧 10 ~ 19 m 两处溶腔内发现积水潭,并在溶腔壁上发现水位痕迹线。

(1)DK 34 + 120.9 左 50 m 溶洞底部有地下出水点,呈积水潭,溶洞大厅溶壁可见水流痕迹线。现场测得 DK 34 + 120.9 左侧 50.11 m 处溶洞壁水淹痕迹高

程为 1 330.99 m,DK 34 + 126.848 左侧 12.230 m 处溶洞壁水淹痕迹高程为 1 341.35 m,溶洞内集水潭水位比隧道底板底面标高低 31.8 m,从而判断隧道处于地下水垂直循环带内。

(2)在 DK 34 + 404 左侧 10 ~ 19 m 处,溶洞底有缓慢流动的流水沟,并呈积水潭,水位在隧底以下 10.1 m,积水潭水位标高为 1 368.65 m(2017 年 12 月 8 日测量),洞壁可见历史最高水位线标高 1 371.77 m,该水位较筏板顶面低约 3.5 m。2018 年 8 月 7 日,暴雨使积水潭向上返水,最高水位高程达 1 374.07 m,较筏板顶面仅低 1.2 m,由于施工破坏了溶洞内地下水的径流通道,地下水流动受阻,隧底溶洞内地下水上升,涌水至隧底,造成隧底水害。

3.4 实测断面流量法

为准确计算隧道涌水量,将隧道出水点及涌水点的地下水集中汇入隧道中心水沟,实测中心水沟断面流量的方法即为实测断面流量法。

大用隧道出口 DK 38 + 320 ~ DK 38 + 710 段位于六枝向斜轴部,向斜轴部发现大型充填溶洞<sup>[8]</sup>,并出现溶腔涌水现象,施工中在里程 DK 38 + 710、DK 38 + 704、DK 38 + 480、DK 38 + 430、DK 38 + 415、DK 38 + 352、DK 38 + 325、DK 38 + 320 共 8 处出现出水点及涌水点。2017 年 5 月 1 日至 2017 年 8 月 17 日对其进行了一个雨季的观测,并绘制了流量曲线折线图。其中 2017 年 6 月 11 日六枝地区出现特大暴雨,隧道涌水点汇入中心水沟的水量为隧道最大值。采用

中心水沟实测断面流量法计算隧道最大涌水量,流量计算公式为:

$$Q = L/T \times S \tag{3}$$

式中: $L$ ——指定流距;

$S$ ——水流截面面积;

$T$ ——时间。

经计算,大用隧道六枝向斜轴部 DK 38 + 320 ~ DK 38 + 710段隧道涌水量为 152 064 m<sup>3</sup>/d。

3.5 流量汇总法

实测隧道每个出水点及涌水点的流量,逐点汇总其流量,来估算隧道涌水量的方法叫流量汇总法。

地宗隧道进口 DK 42 + 200 ~ DK 42 + 411 和 DK 43 + 325 ~ DK 43 + 496段地表水冲沟、洼地、落水洞、断头沟发育,隧道洞身发育地下暗河及岩溶管道水,隧道开挖时出现了涌水现象,其中 DK 43 + 418处拱顶涌水最大量,呈放射状涌出。通过 2017 年 4 月 24 日至 2017 年 9 月 7 日对隧道涌水量的观测,发现在 2017 年 6 月 22 日和 2017 年 6 月 30 日两次时间点出现隧道涌出水量最大。隧道观测出水点位置及最大流量值汇总如表 3 所示。

表 3 地宗隧道涌出水点位置及流量汇总表

序号	涌水点里程	涌水情况	涌水量/(m <sup>3</sup> /d)
1	DK 42 + 201 ~ DK 42 + 272	拱顶股状水涌出	18 144
2	DK 42 + 406	拱顶左侧股状水垂直下流	1 000
3	DK 42 + 411	拱顶左侧股状水垂直下流	430
4	DK 43 + 325 ~ DK 43 + 349	线路左侧边墙泄水孔涌水	240
5	DK 43 + 418	溶洞涌水最大	82 080
6	DK 43 + 471	左侧拱脚出水较大	51 840
7	DK 43 + 496	左侧拱脚溶洞有股状水流出	120

经计算,地宗隧道进口 DK 42 + 200 ~ DK 42 + 411 和 DK 43 + 325 ~ DK 43 + 496 两段隧道涌水量总计 153 854 m<sup>3</sup>/d。

4 隧道病害整治方案研究

位于六枝向斜的 4 座隧道在施工过程中都出现了较大涌水,因此,本文研究了设置泄水洞的方案来整治隧道涌水。经分析,4 座隧道涌水都位于地下水上游侧,故将泄水洞设置于上游来水侧。岩脚隧道和对门寨隧道位于六枝向斜的北翼,地下水由线路右侧流向左侧,故岩脚隧道和对门寨隧道泄水洞设置于线路右侧来水侧;大用隧道位于六枝向斜轴部,隧道施工中左、右侧边墙均出现了涌水,故大用隧道向斜轴部段左、右侧均设置泄水洞;地宗隧道位于六枝向斜南翼,地下水由线路左侧流向右侧,故地宗隧道泄水洞设置

于线路左侧。结合隧道纵坡及人字坡情况,泄水洞顺坡排水。

4.1 岩脚隧道

进口里程 DK 30 + 694,出口里程 DK 33 + 105,全长 2 407 m,进口以 16‰上坡,出口以 3‰下坡。施工揭示 DK 32 + 343 ~ DK 32 + 360段暗河管道出现涌水、涌泥沙,DK 32 + 908处有岩溶涌水情况,计算隧道涌水量约 149 000 m<sup>3</sup>/d,经研究,于隧道 DK 32 + 300 ~ DK 33 + 101段线路右侧设置泄水洞,泄水洞长 824 m,并于 DK 32 + 343、DK 32 + 360、DK 32 + 908共 3 处设置集水廊道,岩脚隧道泄水洞平面如图 1 所示。

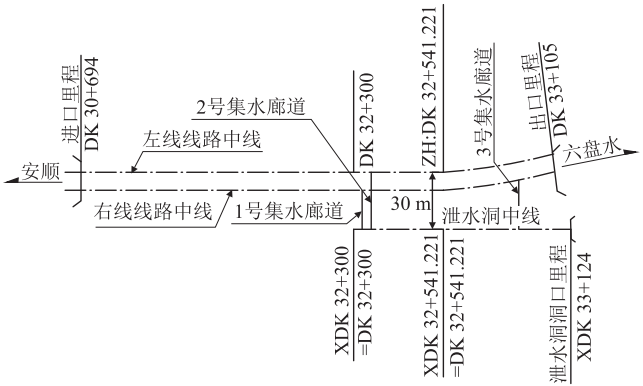


图 1 岩脚隧道泄水洞平面示意图

4.2 对门寨隧道

进口里程 DK 33 + 844,出口里程 DK 35 + 600,全长 1 756 m,全隧以 5‰单面上坡。施工过程中,DK 34 + 120 ~ DK 34 + 215、DK 34 + 343 ~ DK 34 + 440 2 段遇到岩溶管道及溶洞大厅,DK 34 + 410 ~ DK 34 + 415左侧积水潭洞壁历史最高水位高程 1 374.074 m,极端暴雨后的出水量约 41 000 m<sup>3</sup>/d。经研究在 DK 33 + 844 ~ DK 34 + 747.22段线路右侧增设泄水洞,泄水洞全长 982 m,并于 DK 34 + 404、DK 34 + 740两处设置集水廊道。对门寨隧道泄水洞平面如图 2 所示。

4.3 大用隧道

进口里程 DK 36 + 898,出口里程 DK 39 + 054,全长 2 156 m,进口至 DK 37 + 500 为 25‰下坡,DK 37 + 500 至出口为 10‰下坡。DK 38 + 710 ~ DK 38 + 320 段位于六枝向斜核部,为排泄基准面,有较为丰富的岩溶水,施工过程中多次揭示溶洞及溶蚀裂隙,且溶洞有股状水流出或涌水,极端暴雨后 DK 38 + 390 ~ DK 38 + 900 段线路右侧涌水量为 78 200 m<sup>3</sup>/d,DK 38 + 300 ~ DK 38 + 600 段线路左侧涌水量为 109 200 m<sup>3</sup>/d,实测 DK 38 + 320 ~ DK 38 + 710 段隧道最

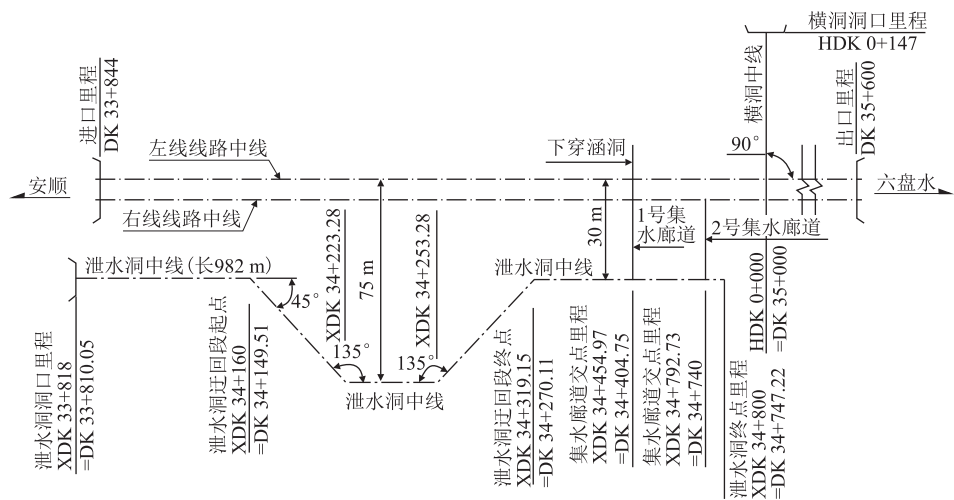


图2 对门寨隧道泄水洞平面示意图

大涌水量为  $= 1\,526\,00\text{ m}^3/\text{d}$ 。经研究,在 DK 38 + 55.45 ~ DK 38 + 545.55 段设置左线泄水洞; DK 38 + 301.7 ~ DK 39 + 064.99 段设置右线低位泄水洞; DK 38 + 277.23 ~ DK 38 + 470 段设置右线高位泄水洞;于 DK 38 + 570 处设置下穿正洞段连接左右线泄水洞,并于 ZDK 38 + 266.7、ZDK 38 + 395、ZDK 38 + 445、ZDK 38 + 495、ZDK 38 + 540、Y1DK 38 + 292、Y2DK 38 + 479、Y1DK 38 + 430、Y2DK 38 + 679.3、Y2DK 38 + 703.1 共 10 处设置集水廊道。大用隧道泄水洞平面如图 3 所示。

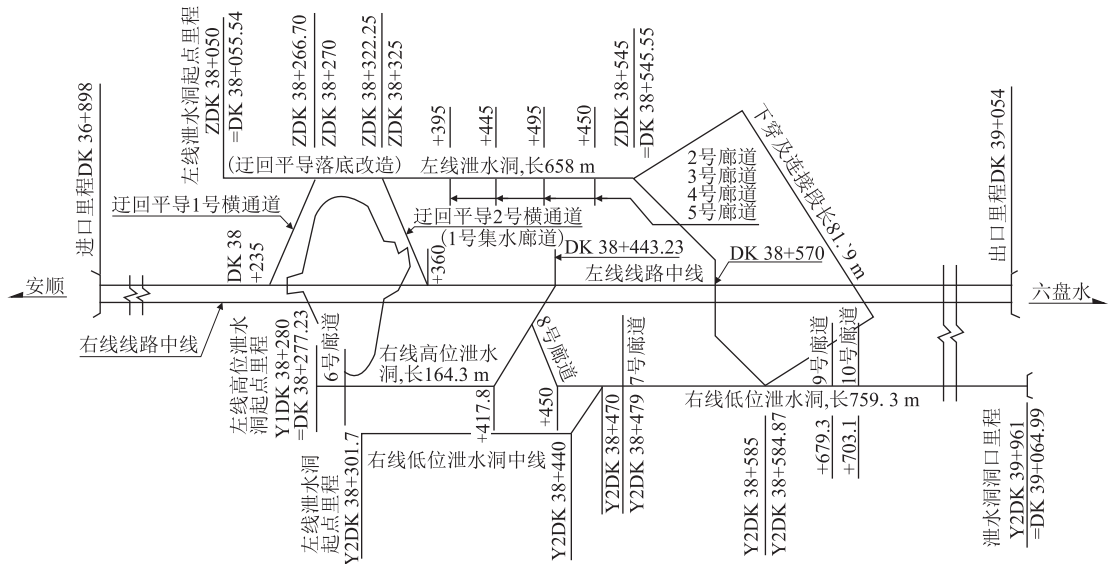


图3 大用隧道泄水洞平面示意图

4.4 地宗隧道

进口里程 DK 41 + 720,出口里程 DK 44 + 765,全长 3 045 m。进口至 DK 44 + 050 为 20‰ 上坡,DK 44 + 050 至出口为 10.2‰ 的下坡。施工过程中 DK 41 + 746 ~ DK 41 + 890、DK 42 + 201 ~ DK 42 + 411、DK 43 + 325 ~ DK 43 + 668 等段落多处揭示大溶洞及溶蚀裂隙,且有股状水流出或涌水,地表洼地出现岩溶塌陷、开裂、坍方冒顶、水井失水干枯等环境地质问题<sup>[9]</sup>。极端暴雨后涌水量为  $144\,800\text{ m}^3/\text{d}$ ,2016

年 5 月至 2018 年 7 月隧道最大涌水量  $153\,854\text{ m}^3/\text{d}$ 。经研究从 DK 41 + 720 ~ DK 43 + 710 段左侧设置泄水洞,泄水洞长 2 017 m,并于 XDK 41 + 741、XDK 41 + 863、XDK 42 + 115、XDK 42 + 135、XDK 42 + 210、XDK 42 + 245、XDK 42 + 260、XDK 42 + 402、XDK 43 + 337、XDK 43 + 420、XDK 43 + 475、XDK 43 + 495、XDK 43 + 671 共 13 处设置集水廊道。地宗隧道泄水洞平面如图 4 所示。

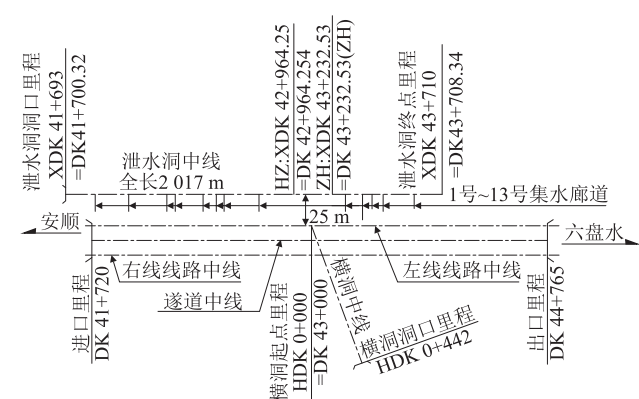


图4 地宗隧道泄水洞平面示意图

5 结论

线路选线应避免隧道通过富水向斜地下暗河径流排泄区,必须通过时,应尽量拔高线路标高,将隧道设置于岩溶水的垂直循环带内,隧道纵坡采用人字坡。

对岩溶隧道建议采用封闭洼地法、溶腔壁地下水位置痕迹线法、井泉补给法及隧道内溶洞涌水量观测等多种方法预测隧道涌水量,综合对比分析后确定推荐隧道涌水量。

在隧道来水侧设置泄水洞,并于泄水洞与正洞出水点设置集水廊道,通过对地下水进行充分引排,确保隧道衬砌结构及后期铁路运营的安全。

参考文献:

[1] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程地质手册[M]. 北京: 中国铁道出版社,2007.

The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Handbook for Railway Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.

[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 and Design Institute of the Ministry of Railways. Karst Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House,1984.

[3] 罗林, 岳志勤. 成贵铁路宜宾至毕节段岩溶勘查与选线[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3): 77-83.

LUO Lin, YUE Zhiqin. Karst Exploration and Route Selection on Yibin-Bijie Section of Chengdu-Guiyang Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 77-83.

[4] 毕强, 何小勇, 刘继宝. 渝利铁路岩溶区选线[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(3): 57-60.

BI Qiang, HE Xiaoyong, LIU Jibao. Route Selection for Chongqing-Lichuan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(3): 57-60.

[5] 汪锋华, 高崇华. 成贵铁路绕避地下水水平循环带线路方案研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(1): 56-59.

WANG Fenghua, GAO Chonghua. Research on Route Scheme of Chengdu-Guiyang Railway Passing round Groundwater Level Cycling Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(1): 56-59.

[6] 毛邦燕. 现代深部岩溶形成机理及其对越岭隧道工程控制作用评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.

MAO Bangyan. Formation Mechanism of Modern Deep Karst and Evaluation of Control Action of It on Through-mountain Tunnel [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.

[7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 安六线岩溶水文地质专题报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2013.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Special Report on Karst Hydrogeology in Anshun-Liupanshui Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2013.

[8] 蒋良文, 易勇进, 贾中明. 圆梁山隧道毛坝向斜深埋大型充填溶洞及其形成机制分析[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(4): 53-60.

JIANG Liangwen, YI Yongjin, JIA Zhongming. Research on Characteristics and Formation Mechanism of Great Deep Buried Infilled Caves at Maoba Syncline in the Yuanliangshan Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(4): 53-60.

[9] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 107-110.

FU Kailong. An Analysis of the Karst Ground Collapse and Water Yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusui Expressway [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(2): 107-110.

(编辑: 刘会娟 张红英)