

文章编号: 1674—8247(2023)01—0081—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.015

玉京山隧道巨型溶洞地质特征与稳定性评价

叶 堃 丁浩江 岳志勤

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:成贵高速铁路玉京山隧道施工中遭遇高速铁路建设史上的最大溶洞,溶洞下部发育大型暗河,洞内充填物厚度大,成分复杂,工程地质环境复杂,处理难度大、施工安全风险性高。现场采用地质调查及测绘、三维激光扫描、水文观测、物探、钻探、孔内测试、取样试验等综合勘察手段,查明了巨型溶洞的形态特征、水文地质特征和充填物工程地质特征,对洞壁稳定性进行了分析和评价,预测了洞顶塌落高度及稳定性,提出了“暗河改道、溶洞回填、桥梁跨越”总体处理措施建议,为合理确定施工整治方案提供了详实的地质依据。研究成果可为山区高速铁路岩溶勘察提供重要参考。

关键词:隧道工程; 巨型溶洞; 工程地质特征; 分析评价

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

Geological Characteristics and Stability Evaluation of Giant Karst Cave Affecting Yujingshan Tunnel

YE Kun DING Haojiang YUE Zhiqin

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

Abstract: During the construction of the Yujingshan Tunnel of Chengdu-Guiyang High-speed Railway, the largest karst cave in the history of high-speed railway construction was encountered, where the geological environment is complicated, with large underground rivers developed underneath and thick filling materials of complex composition inside. The treatment is difficult, and the construction safety risk is high. Comprehensive investigation methods including geological survey and mapping, 3D laser scanning, hydrological observation, geophysical prospecting, drilling, in-hole testing, and sampling tests were applied on-site to find out the morphological characteristics, hydrogeological characteristics, and geological characteristics of fillings in this giant karst cave, analyze and evaluate the stability of cave walls, and predict the collapsed height and stability of the roof. The overall treatment measure of “diverting underground rivers, backfilling karst cave, and crossing with bridges” was put forward, which provided a detailed geological basis for reasonably determining the construction treatment scheme. The research results can provide an important reference for investigating the karsts of high-speed railways in mountainous areas.

Key words: tunneling; giant karst cave; geological characteristics; analysis and evaluation

岩溶是工程建设中普遍存在的地质灾害,常见于铁路、矿山及水工隧洞等建设中。2016年7月

23日,玉京山隧道横洞工区出口端上台阶开挖至D3K 279+948处,当晚23点30分,在进行下一循环开

收稿日期: 2021-11-18

作者简介: 叶堃(1981-),男,高级工程师。

引文格式: 叶堃,丁浩江,岳志勤. 玉京山隧道巨型溶洞地质特征与稳定性评价[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 81-85.

YE Kun, DING Haojiang, YUE Zhiqin. Geological Characteristics and Stability Evaluation of Giant Karst Cave Affecting Yujingshan Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 81-85.

挖爆破后,掌子面中线位置揭示1个约1 m×2 m左右的溶洞口,并伴有掉块的现象;23点50分,掌子面出现坍塌,最终形成1个约7 m×10 m的溶洞口,前方巨型溶洞^[1-3]也展现出来。溶洞空腔部分体积达110万 m³,底部有1条平常期流量达20 m³/s的暗河。隧道靠近溶洞顶部通过,受巨型溶洞内复杂工程地质环境影响,处理方案和后续施工组织制定十分困难。本文针对巨型溶洞和暗河^[4]的工程特征进行科学研究和评价,提出切实可行的建议措施,对后续处理方案的制定具有重要意义。

1 隧道工程地质概况

玉京山隧道起止里程 D3K 277 + 860~D1K 284 + 164,全长 6 304 m,地处云贵高原北部,大娄山脉西侧威信县境内,位于四川盆地向云贵高原过渡的地形急变带,海拔高程 1 000~1 600 m,相对高差 90~600 m,地形陡峻,沟谷纵横,洞身穿越南广河流域与赤水河流域的区域分水岭。

隧道洞身通过的地层从三叠系下统到寒武系中上统,缺失石炭系和泥盆系,主要岩性为砂岩、泥页岩、灰岩、白云岩,少量的火山碎屑岩和盐溶角砾岩,局部夹煤层。总体为单斜岩层,岩层走向和线路交角约 45°,倾向小里程端,倾角为 40°~70°;洞身共穿

越 3 条断层。隧道在 D3K 279 + 515~D3K 280 + 310 段为二叠系栖霞组和茅口组的灰岩,1 条长 18 km 的暗河和线路大角度相交于 D3K 279 + 990 处,暗河进口高程 1 224 m,出口高程 810 m,平均水力坡度 2.3%^[5],预测相交处暗河水面位于轨面 71 m 以下。玉京山隧道构造和水文地质如图 1 所示。

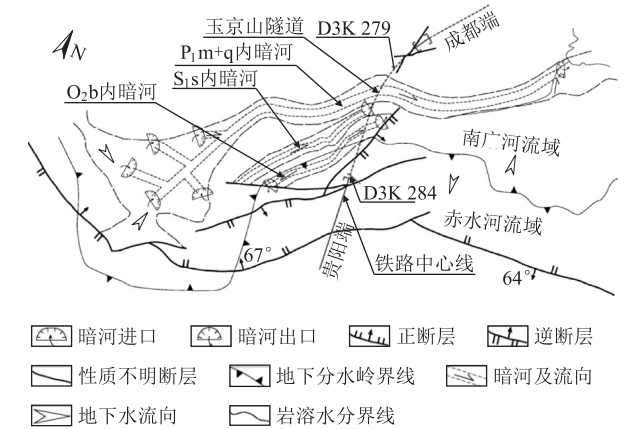


图1 玉京山隧道构造和水文地质图

测区分为3级剥夷面3个地貌发展时期,如表1所示。隧址区岩溶主要发育山盆期和峡谷期岩溶形态,竖向和水平向岩溶发育,岩溶水主要赋存于管道中,地下暗河体系发育^[6]。

表1 区域地貌及剥夷面发育特征表

地貌发展时期	剥夷面级别	岩溶发育面及高程	地貌特征	岩溶形态特征
大娄山期	第Ⅰ级	Ⅰ级,受后期侵蚀少有保留	为高原台面,形成于燕山期,受后期侵蚀和构造运动影响,仅在高大的分水岭地带残存	落水洞和小型洼地为主,多被黏性土充填,基本停止发展
山盆期	第Ⅱ级	Ⅱ级,1 500~1 600 m	为高原台面和第三级剥夷面之间的发展时期,位于第三纪末期至第四纪初,山间盆地的形式为其特点	垂直和水平管道发育,大面积的峰丛洼地、落水洞、岩溶漏斗和地下暗河相互联通
	第Ⅲ级	Ⅲ级,1 000~1 200 m		水平管道为主,大面积的峰丛洼地,岩溶大泉、地下暗河发育
峡谷期	第Ⅲ级剥夷面形成后	该段时期地面进入持续、快慢不一的上升过程,在河流地段见有3层溶洞残留	自更新世末期开始,第三级剥夷面形成之后,测区进入持续地、快慢不一的上升期。在此时期,赤水河及支流急剧下切,形成深嵌于高原地面中的峡谷,切割深度一般500 m左右,河流溯源侵蚀作用十分强烈,严重地破坏了高原台面和山盆期剥夷面	以水平岩溶管道为主,地表水和暗河发育

2 巨型溶洞岩溶形态及洞底堆积物特征

采用三维激光扫描、常规测量手段及地质调查,查明该巨型岩溶大厅、及相互连通的支溶洞和暗河的形态特征。

隧道 D3K 279 + 865~D3K 279 + 956 段近 80°穿越巨型溶洞中上部。溶洞横向长 230 m,宽 93 m,呈蚕豆状,高 50~90 m,洞顶总体为线路左侧低,右侧高,

洞顶高程 1 040~1 093 m,呈穹窿状,中下部普遍分布钙质胶结壳,有零星钟乳石分布。溶洞底部也为左侧低右侧高,地面高程为 964~1 048 m,高差约 84 m;洞底右侧下部有 1 条暗河通过,洞周有 4 个支岩溶管道出口。线路通过溶洞处洞顶标高 1 039~1 087 m,洞底高程 1 028~1 046 m,轨面高程 1 077~1 079.5 m,轨面距洞底部 31~51 m。

溶洞和隧道的相互关系为:D3K 279 + 865~+900

隧道轮廓段位于溶洞顶板上方;D3K 279+900~+950 隧道轮廓位于溶洞内,隧道洞顶和溶洞顶板基本齐平;D3K 279+950~D3K 279+956 段隧道轮廓位于溶洞顶板上方。

巨型溶洞上游发育2层大型溶洞,位于线路DK 280+070 右侧10 m,洞底部为卵砾石堆积,为古

暗河通道。溶洞可实测长度50 m,横向宽10~50 m,洞顶成穹隆状,溶洞顶最高处高程1 018.9 m,溶洞底高程为980~1 004 m,洞高10~40 m。隧道轨面和溶洞顶板的最小距离为58 m。巨型岩溶洞穴和暗河平面形态特征如图2所示。

洞底中部表层为软塑状黏土,表层零星分布有

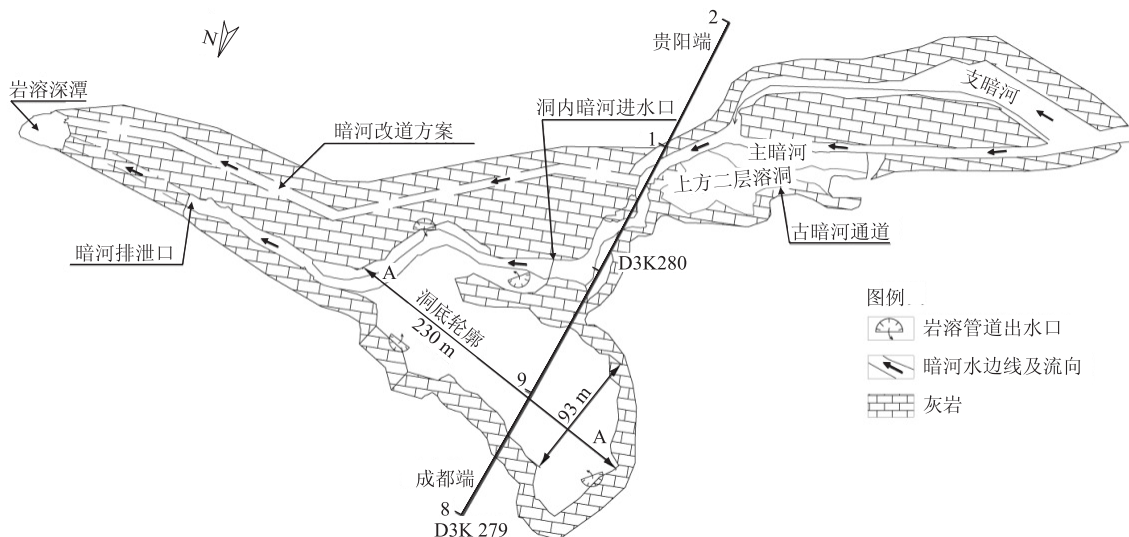


图2 巨型岩溶洞穴和暗河平面形态特征图

石笋、石盆,上部和下部表层为碎块石,且上部碎块石堆积体呈小丘状,有明显新近塌落块石形成的泥痕,偶有钙化结晶分布于表层。洞底部采用TEM和主动源面波法相结合的物探方法对堆积体进行探测,并结合钻探进行验证。探测结果显示:洞底充填物厚30~100 m,表层0~15 m为软塑状黏土,下部为中密~密实状碎块石土,其间局部夹厚0~15 m的软塑状黏土和厚0~5 m的砂土,下伏灰岩较完整,岩溶强烈发育,土石界面起伏大,且土石界面总体倾向和岩层面倾向一致,溶洞形态主要沿层面倾向发育。

3 巨型溶洞暗河水文观测及流量预测

3.1 巨型溶洞暗河水文观测

暗河廊道可实测段长约740 m,呈S型蜿蜒延伸,总体延伸方向为N75° E,和岩层走向一致,从线路的右侧向左侧径流(流向NE向),廊道宽4~15 m,总体呈不规则的矩形。暗河进入巨型溶洞的入口洞宽13 m、高2.23 m,水面距暗河顶板1.7 m;暗河在洞内的排泄口为1个深潭,排泄口顶板宽8 m,高出水面0.3 m,水流极为缓慢,排水口净空远小于进水口。隧道在DK 279+982~DK 280+100段位于暗河廊道正上方,该段暗河底高程为962~965 m,顶高程为973.9~1 018 m,轨面和暗河廊道顶板距离为

59~103 m。

现场在揭示暗河后,在洞内暗河段和整个暗河的出口处分别设置了观测断面进行水文观测,测量水位深度,按《隧道设计手册》中的式(1)~式(5)计算暗河水量,结果如表2所示。

$$Q = \omega c (R_i)^{1/2} \quad (1)$$

$$V = c (R_i)^{1/2} \quad (2)$$

$$R = \omega / X \quad (3)$$

$$C = (1/n) R_y \quad (4)$$

$$y = 2.5n^{1/2} - 0.75R^{1/2}(n^{1/2} - 0.1) - 0.13 \quad (5)$$

式中: Q ——流量(m^3/s);

V ——平均流速(m/s);

ω ——过水断面面积(m^2);

C ——系数;

R ——水力半径(m);

i ——沟床纵坡,按小数带入公式计算;

X ——湿周,断面上流体与沟壁接触面长度(m);

n ——沟壁糙度系数。

暗河总长约18 km,总汇水面积85 km^2 ,巨型溶洞位于暗河中下游,其上游总汇水面积58 km^2 ,占面积的68%。由表2暗河水文观测统计表可知,溶洞内暗河流量只占整个暗河出口处流量的10%~30%,说明岩溶大厅下部揭示暗河为暗河体系中的1条。此外,

表 2 暗河水文观测统计表

序号	溶洞内暗河流量/(m ³ /s)	整个暗河出口流量/(m ³ /s)	降雨情况/(mm)	观测日期
1	20.16	68.75	10.0	2016.9.15
2	18.17	62.95	6.8	2016.9.21
3	18.66	62.95	1.6	2016.9.26
4	16.26	59.54	0.0	2016.10.2
5	17.68	63.1	5.6	2016.10.10
6	18.66	62.95	15.3	2016.10.16
7	15.33	56.14	0.0	2016.10.20
8	13.55	51.12	0.3	2016.10.24
9	5.26	51.37	0	2016.11.5
10	5.26	54.03	0.8	2016.11.12
11	4.91	52.96	0	2016.11.17
12	4.07	53.65	0	2016.12.6
13	4.4	55.02	0.5	2016.12.13
14	4.4	53.24	0	2016.12.20

在沿线路的方向勘探孔的土石分界面附近发现有近代才有的橡胶皮,在标高 968 m 附近分布有厚约 2 m 的粉细砂层。根据这些通过暗河水流带入和形成的充填物可推测在巨型溶洞上游还分布有暗河体系中的支暗河,这和水文统计分析结果相吻合。

洞内暗河进口处断面净空远大于排泄口处,在雨季极端天气下,水量急剧增大后,下游排泄不畅,洞内水位会急剧上升成为蓄水水库。在溶洞内 D3K 279 + 877 左侧 95 m (标高为 990 m),洞底堆积层表面为大片明显的板结状黏土静水沉积物,由暗河水位上涨到该处缓慢沉积形成,水位上涨约 30 m,由此验证了上述预测。

3.2 巨型溶洞暗河流量预测

根据实测,暗河进入溶洞内入口断面宽 13 m、高 2.23 m,纵坡 $i = 1.66\%$,进水口洞壁周边均有明显的水流冲刷痕迹,最大冲刷高度约 1.3 m,过水断面面积 $\omega = 17\text{ m}^2$,沟壁糙度系数 $n = 0.035$,代入式(1)计算该溶洞内暗河最大流量 $Q = 67\text{ m}^3/\text{s}$ 。

4 巨型岩溶洞穴成因浅析

溶洞的形成主要受两个因素控制:具有溶蚀能力的运动水流和岩石具有水渗透的空间。岩石裂隙的几何构造方位控制着溶洞形态。测区内多年平均降雨量达 1 217.96 mm,为溶洞的形成提供了充足的水流条件,而岩体间的结构面为水流提供了渗透空间。在洞内暗河形成演化的漫长年代中,分布于巨型溶洞上部 and 下部两暗河间的岩体也在地下水的作用下形成了同时期岩溶管道和岩溶洞穴。当单个独立的管道、溶洞随着溶蚀作用的不断发展壮大后,最终汇集

到一起形成巨型溶洞的雏形。在山盆期向峡谷期演变发展过程中,随着地壳的间断性抬升,岩溶水^[7]不断向下溶蚀、侵蚀使溶洞进一步沿竖向发展,并在洞周岩体不断沿层面和优势裂隙面切割坍塌和水流冲刷的综合作用下,最终发展形成目前半充填状的巨型溶洞。

5 洞底堆积物稳定性评价

洞底填充物厚度大、成分复杂,规律性差,整体坡面为 20°~35°,坡面未见有开裂、挤出等变形迹象;取线路下方黏土表层岩溶石盆底部钙化结晶体进行 C14 测年分析,其形成时间为 $3.66 \pm 0.04 \sim 3.84 \pm 0.05\text{ ka}$,说明斜坡体保持目前的稳定状态 $\geq 3.62\text{ ka}$;总体评估斜坡为稳定状。为准确评估其稳取典型剖面,借助 FALC SLOPE 采用极限平衡法计算堆积物坡体的稳定性,模型考虑实际工况下任意形状滑动面。经计算,溶洞底部堆积物的稳定系数为 1.12。坡体在未加荷载的状况下为稳定状态,但坡脚为暗河,水量大,流速快,会对坡脚形成冲蚀和掏蚀,导致坡脚失稳从而影响整体稳定性。根据 TB 10027 - 2012《铁路工程不良地质勘察规程》的岩溶塌陷分级标准,洞内塌陷评分为 95 分,属于极易塌陷区。综合判定洞底堆积物在后期存在失稳风险。

6 巨型溶洞洞顶稳定性评价

6.1 洞顶稳定性分区

巨型溶洞发育于二叠系下统栖霞茅口组(P1 q + m)灰岩,局部夹碳质灰岩,厚度 ~ 巨厚层夹中厚层状,岩层走向和溶洞主轴交角 31°,倾角 55°。经过多期次的坍塌后,洞顶成穹隆状,已形成自然塌落拱,总体稳定。为制定后续溶洞治理和施工方案,对洞顶稳定性进一步细化评价,分析因素及评判标准为:岩面越新鲜说明近期发生过塌落,稳定性差,反之岩面分布有钙质胶结壳、溶蚀窝状面、钟乳石等稳定性好;洞底有新近塌落堆积体对应洞顶稳定性差;节理裂隙发育密集段稳定性差;支管道和裂隙水越发育稳定性越差。

根据现场调查情况和分析评判得出洞顶稳定性分区图(如图 3 所示),该分区图将洞顶共分成 3 个区:稳定性好区域,洞顶塌落风险低;稳定较好区域,洞顶局部塌落可能性较高;稳定性差区域,洞顶局部塌落可能性高。线路总体位于稳定性好的区域,局部位于稳定性差的区域。

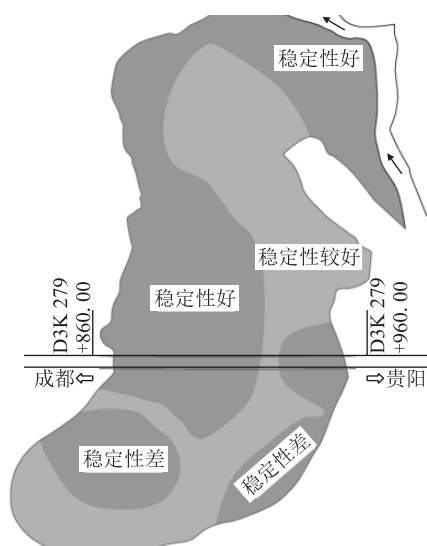


图3 巨型溶洞顶稳定性分区图

6.2 洞顶塌落高度预测

(1) 现场调查分析

对巨型溶洞洞周岩层层理及节理裂隙进行量测,共取得 29 组层理和 270 组裂隙产状,通过等密度赤平投影,得出控制性层理(N75° W/55° SW)和两组控制性裂隙面(N25° W/76° SW 和 N52° E/48° SE)。岩体主要为受岩层层面和两组控制性裂隙面组合切割形成的楔形体,在自重和地下水等因素作用下产生掉块或塌落。根据洞底单个孤石实测,最大块石块径为 8×4×15 m。现场调查分析认为洞周岩体主要以楔形体产生掉块或塌落,塌落径向高度可能达 15 m。

(2) 理论分析计算

将巨型溶洞概化为长 230 m、宽 93 m 的隧道,按经验公式(6)计算得围岩压力。

$$H = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (6)$$

式中, H 为围岩压力计算高度,在此概化为一次性可能发生的塌落高度; $\omega = 1 + i(B - 5)$, $B > 5$ m 时 $i = 0.1$, $B < 5$ m 时 $i = 0.2$; S 为围岩级别,总体稳定性好,围岩级别为 $S = 2 \sim 3$ 。

取围岩级别 $S = 2.5$, $i = 0.1$,由式(6)计算得到围岩压力计算高度为 12.5 m。现场实际调查情况和概化模型计算得到的塌落高度较为接近,为保证工程的安全性,取径向塌落高度 $H = 15$ m。

7 结论

(1)巨型溶洞的形成主要受山盆期~峡谷期岩溶水动力条件随地壳间断性抬升发生变化,并伴随着洞内坍塌的综合作用形成,溶洞的进一步发展主要受控于洞周的坍塌,目前已处于溶洞发育的晚期。

(2)巨型溶洞内暗河流量大,在雨季水量急剧增加后,由于下游排水能力有限,水位出现激增,巨型溶洞成为 1 个动态蓄水水库,建议暗河改道,防止水位上涨危及主体工程安全。改道下游排泄口的选取,可采用沿暗河延伸方向向下游进行边探测边开挖的方式,揭示 1 个排水能力足的出水口。

(3)巨型洞穴洞顶在长期坍塌后已形成塌落拱,总体稳定,但随着时间推移,在长时间自重、地下水、风化作用及人为扰动的情况下,局部存在塌落掉块的可能,特别是在稳定性差区顶部塌落掉块的可能性高,一旦发生极易危及施工人员的安全。

(4)洞底充填物厚度大,成分复杂,夹有厚层软塑状黏土,物理力学指标低,沉降控制困难,且后期有失稳和塌陷风险,从洞内进行治理难度大。为保证施工及运营安全,不宜在该堆积体上设置工程。

(5)隧道正下方暗河廊道相对较窄,二层溶洞位于隧道侧面,且洞顶距隧底高度 ≥ 59 m,隧道工程可不考虑暗河廊道和二层溶洞对工程的影响。

综合以上分析,为保证处理方案的安全可行,建议总体处理方案为:(1)暗河改道;(2)洞内用洞碴碎块石全回填,保证洞顶和洞底稳定性,为主体工程创造施工条件;(3)隧道洞顶一定范围的溶洞顶板采用锚索加固,径向加固深度 ≥ 15 m;(4)采用桥梁工程跨过该巨型溶洞。

玉京山隧道为成贵高速铁路全线 5 座 I 级风险隧道之一,是全线的控制性工程。隧道施工揭示巨型溶洞和暗河,秉行“绕有依据,过有措施”的思路,通过综合勘察手段查明了巨型溶洞的工程地质和水文地质特征,指出了处理不当对施工和运营可能造成的危害,提出了切实可行的处理措施。玉京山隧道从 2019 年 12 月通车以来,由于巨型溶洞处理措施得当,至今未出现相关病害,相关研究成果可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张英骏,缪钟灵,等. 应用岩溶学及洞穴学[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1985.
ZHANG Yingjun, MIAO Zhongling, et al. Applied Karst and Caveology [M]. Guizhou: Guizhou People's Publishing House, 1985.
- [2] 苗德海. 宜万铁路岩溶隧道灾害及防治对策[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(7): 96-99.
MIAO Dehai. Karst Tunnel Disasters in Yichang-Wanzhou Railway and Prevention Countermeasures [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(7): 96-99.
- [3] 毛邦燕,蒋良文,王科,等. 高速铁路穿越大型溶洞风险评估研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 21-26, 32.

(下转第 90 页)

表 4 实测梁端两侧钢轨支点横向位移(mm)			
测试位置	实测值	限值	通常值
贵阳侧 88 m 与 32 m 简支箱梁梁缝	0.24 ~ 0.35	1.00	0.50

综合克地坝陵河特大桥(88 + 168 + 88)m 连续刚构的检测结果可知:

(1) 桥梁竖向自振频率、竖向挠跨比和梁端竖向转角均满足《高速铁路工程动态验收技术规范》规定的限值要求,同时满足设计值和《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

(2) 梁体跨中竖向振幅最大值为 0.25 mm,梁体跨中横向振幅最大值为 0.09 mm,墩顶横向振幅最大值为 0.04 mm,满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

(3) 无砟轨道相邻梁端两侧的钢轨支点横向相对位移最大值为 0.35 mm,满足《高速铁路工程动态验收技术规范》规定的限值要求;桥梁活动支座的横向动位移最大值为 0.07 mm,均满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》的通常值要求。桥梁动力性能满足动车组以 300 km/h 及以下速度运行时的相关标准要求。

6 结束语

克地坝陵河特大桥主跨 168 m 连续梁刚构桥梁是目前最大跨度高速铁路梁桥,本文中的桥型方案研究对山区超大跨度铁路梁桥设计和选型有借鉴意义。

参考文献:

[1] 范静涛. 艰险山区单线大跨度钢管混凝土拱桥结构分析与方案比选[J]. 铁道建筑技术, 2018(1): 72 – 76.
FAN Jingtao. Structural Analysis and Scheme Comparison of Large Span Single-Track Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge in Complicated Mountain Area [J]. Railway Construction Technology, 2018(1): 72 – 76.

[2] JTG/TD 65 – 06 – 2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
JTG/TD 65 – 06 – 2015 Specifications for Design of Highway Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridges [S].

[3] 陈良江,周勇政. 我国高速铁路桥梁技术的发展与实践[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 27 – 32.
CHEN Liangjiang, ZHOU Yongzheng. Development and Practice of High-Speed Railway Bridge Technology in China [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 27 – 32.

[4] 周勇政,陈良江,高策. 我国高速铁路桥梁设计技术及探索[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 11 – 15.
ZHOU Yongzheng, CHEN Liangjiang, GAO Ce. Design Techniques and Exploration of High-Speed Railway Bridges in China [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 11 – 15.

[5] 乔健,陈良江. 铁路预应力混凝土桥梁收缩徐变控制技术探索[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(6): 1 – 4, 7.
QIAO Jian, CHEN Liangjiang. Research on Shrinkage and Creep Control Technology of Railway Prestressed Concrete Bridge [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(6): 1 – 4, 7.

[6] TB 10621 – 2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621 – 2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

(上接第 85 页)

MAO Bangyan, JIANG Liangwen, WANG Ke, et al. Research on the Risk Assessment of High-Speed Rail Passing through Large Karst Cavern [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 21 – 26, 32.

[4] 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.
Ministry of Railways No.2 Survey and Design Institute. Karst Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.

[5] 薛禹群,朱学愚. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.

XUE Yuqun, ZHU Xueyu. Groundwater Hydraulics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979.

[6] 任美镠,刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
REN Meie, LIU Zhenzhong. Introduction to Karst Science [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983.

[7] 陈明浩,邓宏科,张广泽,等. 昭通隧道岩溶水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 34 – 39.
CHEN Minghao, DENG Hongke, ZHANG Guangze, et al. Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics and Risk Assessment of Water Inrush for the Zhaotong Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 34 – 39.