

文章编号: 1674—8247(2021)03—0033—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.03.007

## 贵南高速铁路岩溶隧道底板型箱体排水 新型衬砌结构研究

曾宏飞<sup>1</sup> 卿伟宸<sup>1</sup> 陶伟明<sup>1</sup> 张志强<sup>2</sup> 钟昌桂<sup>1</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘 要:**本文针对贵南高速铁路隧道工程岩溶发育、分布广、段落长、建设风险高的特点,在总结传统岩溶隧道防排水问题基础上,研究提出了一种适用于复杂岩溶地区的底板型箱体排水新型衬砌结构,可有效降低复杂岩溶地区隧道工程的水害风险。

**关键词:**贵南高速铁路; 岩溶隧道; 新型衬砌; 结构研究

中图分类号:U45.36 文献标志码:A

## Study on the New lining Structure of Floor Box Drainage in Karst Tunnel of Guiyang-Nanning High-speed Railway

ZENG Hongfei<sup>1</sup> QING Weichen<sup>1</sup> TAO Weiming<sup>1</sup> ZHANG Zhiqiang<sup>2</sup> ZHONG Changgui<sup>1</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In view of the high construction risk caused by the well-developed karst, wide karst distribution, and long karst section in the tunnels of Guiyang-Nanning High-speed Railway, a new lining structure with floor box drainage suitable for complex karst areas is proposed on the basis of summarizing the waterproof and drainage problems of traditional karst tunnels, which can effectively reduce the water disaster risk of tunnels in complex karst areas.

**Key words:** Guiyang-Nanning High-speed Railway; karst tunnel; new lining structure; structural study

随着我国铁路建设的不断发展,路网规划的不断实施,西南山区铁路建设发展迅猛,在地质复杂的岩溶地区修建的隧道工程越来越多<sup>[1]</sup>。如宜万铁路,隧道159座,总长约278 km,其中岩溶隧道91座,通过可溶岩段落长度占隧道总长度的58%<sup>[2]</sup>;云桂铁路,隧道170座,总长约402 km,其中岩溶隧道51座,长170.5 km,占全线隧道总长度的42.4%<sup>[3]</sup>;在建贵南高速铁路,新建正线隧道108座,总长257.512 km,其中通过可溶岩段落长度约175 km,占隧道总长度的

68%,是目前我国在建高速铁路中岩溶最为发育的线路之一。

西南山区地形地质条件复杂,岩溶发育极为不规律,勘察设计期间难以完全探明岩溶发育的规模、形态,再加上超前预测准确性的不足,导致施工期间易出现“涌水突泥、隧道失稳、涌水量大、排水不足”等问题。如渝怀铁路圆梁山隧道修建期间发生了32次突水、突泥灾害<sup>[4]</sup>;宜万铁路野三关隧道最高日常涌水量达20万m<sup>3</sup>,历经88次突水、突泥考验<sup>[5]</sup>;沪昆铁路

收稿日期:2020-11-24

作者简介:曾宏飞(1989-),男,工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究计划(KYY2018115(18-23))

引文格式:曾宏飞,卿伟宸,陶伟明,等. 贵南高速铁路岩溶隧道底板型箱体排水新型衬砌结构研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(3): 33-39.

ZENG Hongfei, QING Weichen, TAO Weiming, et al. Study on the New lining Structure of Floor Box Drainage in Karst Tunnel of Guiyang-Nanning High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 33-39.

高塆隧道、岗乌隧道、白岩脚隧道等 10 余座长大隧道在施工期间均出现过不同程度涌水突泥,累积增设泄水洞长约 21 km;沪昆客运专线朱砂堡二号隧道、成贵铁路玉京山隧道均开挖揭示巨型溶洞大厅,投资增加显著,影响建设工期<sup>[6-7]</sup>;织毕铁路杨家坡隧道、大营山隧道等雨季后隧道涌水量远大于设计预估,出现沟槽排水能力不足等问题。

西南山区岩溶隧道在运营期间也常出现“隧底翻浆冒泥、仰拱上拱、道床隆起、排水系统失效、施工缝渗漏涌、衬砌结构破坏”等问题。2012 年 6 月 15 日,黔桂铁路邓山隧道 D1K 125 + 894 左侧水沟底出现涌水、涌砂并进入道床,中断行车 3 h 43 min;2015 年 6 月,由于连续降雨,贵广铁路胡山隧道出现局部轨道上拱,威胁运营安全;2015 年 6 月暴雨后,沪昆铁路麻拉寨隧道 D1K 610 + 390 ~ D1K 610 + 490 段仰拱出现翻浆冒泥、轨道板隆起,威胁运营安全;2014 年 6 月,广昆铁路秀宁隧道 DK 997 + 300 ~ DK 997 + 580 段二衬施工缝渗漏水、局部地下水沿施工缝射出(黄色泥浆水),引起地表塌陷,威胁运营安全<sup>[8]</sup>;2017 年 6 月 30 日暴雨后,沪昆铁路白岩脚隧道左侧侧沟施工缝处大量水流涌出,高度约 2.1 m,水流冲入左线道床与沟槽间,并影响接触网,导致行车中断<sup>[9]</sup>。

总体来看,西南山区地形地质条件复杂,岩溶发育,施工期间各类岩溶病害频发,工期压力大,工程投资大幅增加;运营期间出现的各类岩溶病害,严重影响列车的运营安全,引起了各方的强烈关注,产生了极为负面的社会效应。

## 1 贵南高速铁路岩溶隧道特点

贵南高速铁路全长 482 km,从贵阳至南宁依次通过贵州高原、贵州高原斜坡带、广西盆地三大地貌单元,地貌类型以溶蚀型、侵蚀型、溶蚀侵蚀型为主,地貌形态主要由溶蚀槽谷、溶蚀谷地、峰丛洼地等组成,岩溶地貌极其发育,有“岩溶强烈发育、洼地隧道关联、季节变动带长,水害风险较高”的特点。岩溶隧道发育情况如表 1 所示。

表 1 贵南高速铁路隧道岩溶发育程度统计表

区段	隧道总长/km	岩溶段长度/km	岩溶段所占比/%	弱发育长度/km	中等发育长度/km	强烈发育长度/km
贵州	124.567	65.3	52.42	24.2	17.5	28.2
广西	132.945	110.2	82.89	0.73	0.85	104
合计	257.512	175.5	68.2	24.93	18.35	132.22

贵南高速铁路岩溶主要发育于二叠系、石炭系、泥盆系、奥陶系及寒武系的灰岩、白云岩与白云质灰岩

中,尤其以二叠系、石炭系中最为发育。从表 1 可以看出,全线隧道穿越岩溶段长度占隧道总长的 68.2%,其中岩溶强烈发育段长度占隧道总长的 51.3%。

贵南高速铁路隧道洞身地段多为峰丛、洼地和槽谷,地形起伏较大,坡陡沟深。地表岩溶洼地、落水洞、漏斗、溶洞发育,洼地平面形态呈现为多边形、椭圆形或圆形、长条形及不规则形等。大部分溶蚀洼地底部较平坦,多为残、坡积物堆积,表层被庄稼或灌木、杂草覆盖。根据勘测资料,贵南高速铁路全线对隧道工程有影响的洼地有 329 个,其中贵州段 84 个,广西段 245 个,如表 2 所示。

表 2 贵南高速铁路隧道岩溶洼地分布情况统计表

区段	隧道座数/座	岩溶段隧道长度/km	I 类洼地/个	II 类洼地/个	III 类洼地/个	IV 类洼地/个
贵州	63	65.3	13	30	41	0
广西	45	110.2	42	42	95	66
全线	108	175.5	55	72	136	66

注:1. I 类洼地为隧道正穿或与隧道有紧密水力联系的洼地,其岩溶水对隧道影响大  
2. II 类洼地为隧道左右两侧 200 m 范围内的或者降水漏斗范围内的隧道非正穿洼地,其岩溶水对隧道影响较大  
3. III 类洼地为与线路左右两侧 200 m 范围外且在降落漏斗范围外的、和线路可能有水力联系的洼地,其岩溶水对隧道影响较小  
4. IV 类洼地为与线路无水力联系、低于线路标高,或不在统一水文地质单元内的洼地,其岩溶水对隧道几乎无影响

贵南高速铁路穿越区域气候属亚热带季风型气候,降雨量充沛,部分地区雨季最大日降雨量超过 300 mm。而本线岩溶暗河、洼地、漏斗、落水洞极发育,大气降水绝大部分将渗入隧道,直接威胁隧道安全。贵南高速铁路沿线气象资料如表 3 所示。

表 3 贵南高速铁路沿线气象资料统计表

地区	气温			降雨		蒸发量/%	相对湿度
	多年平均气温/℃	极端最高气温/℃	极端最低气温/℃	多年平均降雨/mm	最大一日降雨/mm		
南宁市	21.8	44.4	-2.1	1 237.9	-	1 556.4	80
河池市	20.3	39.7	-2.0	1 490.0	209.6	1 514.6	78
都安县	21.3	38.8	2.4	1 623.4	153.3	1 168.7	78
环江县	20.2	39.1	-2.70	1 388.7	218.5	1 386.4	78
荔波县	18.5	39.2	-4.3	1 211.9	172.8	1 364.4	77
独山县	15.0	34.4	-8.0	1 354.9	166.4	1 250.0	82
都匀市	16.1	36.3	-6.9	1 478.8	307.4	1 234.8	78.8
贵定县	15.0	35.5	-8.9	1 138.5	234.9	1 329.6	79.5
龙里县	14.8	34.4	-9.2	1 094.2	146.7	1 255.0	79.7
贵阳市	15.3	39.5	-9.5	1 200.0	133.9	776.0	76.9

贵南高速铁路沿线隧道穿越各类型可溶岩段落长度长约 175 km,通过垂直渗流带约 31.1 km,季节变动带 130.3 km,水平循环带 11.6 km,深部缓流带 2.5 km。贵南高速铁路隧道岩溶分带如图 4 所示。

表 4 贵南高速铁路隧道岩溶分带情况统计表						
区段	隧道总长/km	岩溶段长度/km	岩溶段所占比例/%	垂直渗流带/km	季节变动带/km	水平循环带/km
贵州	124.567	65.3	52.42	14.28	40.37	10.62
广西	132.945	110.2	82.89	16.79	89.93	3.52
合计	257.512	175.5	68.2	31.06	130.30	14.13

从表 4 可以发现,沿线隧道通过季节变动带的比例占其全部岩溶隧道段落的 74.46%,表明其沿线隧道岩溶发育段落大部分位于季节变动带。在季节变动带,地下水的运动随季节变动,呈周期性的升降变化,在此分带中,岩溶发育最强烈,常形成复杂的大型溶洞、暗河、地下湖等。因此,处于此分带的隧道,发生岩溶水害事件的概率较高。

2 传统岩溶隧道存在的问题

目前在建及运营的岩溶隧道衬砌结构大部分为仰拱型衬砌,其排水系统以“隧道体内排水”为主要模式,地下水排放路径为:围岩→初期支护→排水盲管→侧沟→横向排水管→中心水沟(双线)或围岩→初期支护→排水盲管→侧沟(单线或双线),即隧道结构周边的水通过初期支护渗透经由排水盲管引排至隧道结构本体之内的水沟,最终排出洞外。衬砌排水系统现主要存在以下三个方面的问题:

(1)隧底积水无法引排

仰拱型衬砌中心水沟(或侧沟)设于隧道结构之内,主要引排拱墙范围的周边地下水,隧道仰拱以下的积水无法有效引排、仰拱承受部分水压,加之仰拱及填充、填充本身存在的施工缝以及隧道纵向施工缝,极易引起隧底翻浆冒泥,填充道床隆起。

(2)排水系统易于堵塞

岩溶地区地下水往往带有各类化学离子,与混凝土或喷射混凝土材料相互作用后往往形成各类型结晶体,堵塞隧道环向盲管、纵向盲管等排水系统,导致隧道排水系统失效,岩溶水从衬砌结构薄弱环节,如施工缝等渗漏进入隧道,严重时甚至引起衬砌结构的破坏。

(3)雨季排水能力不足

仰拱型衬砌受道床结构、洞内附属构筑物及隧道断面工程经济性制约,考虑施工难易程度,洞内侧沟或中心沟的过水断面自由度不大,过水能力受限,在极端暴雨气候条件下,地下水水位骤增,形成超高水压,导致隧底仰拱隆起,衬砌结构破坏等岩溶病害。

具体问题示意如图 1 所示。解决上述问题的传统方法主要有:

(1)加强排水能力,设置隧道泄水孔

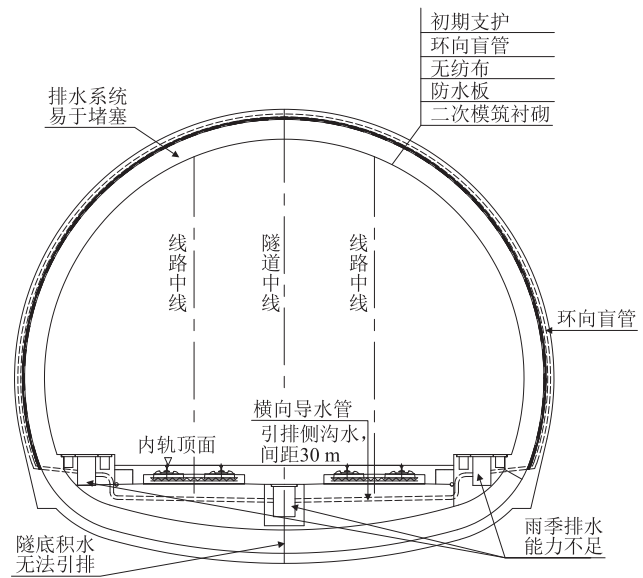


图 1 岩溶隧道衬砌排水系统存在问题示意图

加强隧道拱墙部位盲沟的排水能力、加密边墙泄水孔的设置,降低拱墙部分水压,但难以有效降低隧底结构承受的水压。

(2)加强衬砌结构,提高抗水压能力

一方面增设衬砌钢筋或加强衬砌配筋,提高其承载能力,降低衬砌开裂风险;一方面加大衬砌厚度、调整仰拱曲率,设置圆形或近似圆形断面,采用抗(部分)水压衬砌。但单纯增加配筋难以有效防止仰拱隆起及道床变形,圆形抗水压衬砌投资大,且高水头地段难以实施。

(3)设置泄水洞,疏排隧周岩溶水

设置泄水洞可大幅度降低岩溶隧道风险,但工程造价巨大;泄水洞距离正洞约 20~30 m,难以完全袭夺地下水,在建成的铁路隧道中,个别隧道即使设置了泄水洞排水,正洞仍出现隧底变形开裂等岩溶病害,如图 2 所示。另外,泄水洞的养护维修也存在很大问题。

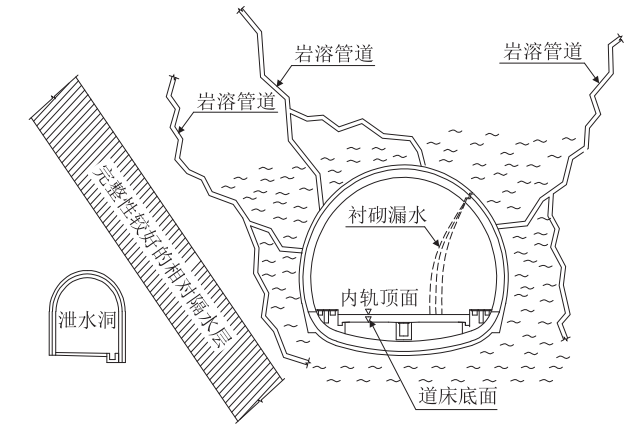


图 2 泄水洞未能揭示岩溶水\正洞持续水害示意图

因此,设置有效的防排水体系尤其是隧底排水系统成为岩溶隧道设计的关键。为降低复杂岩溶地区隧道运营安全风险,改善防排水系统势在必行,而防排水系统又与衬砌结构尤其是隧底结构直接相关,为此应首先优化隧底结构。因施工繁琐、维护管理困难等问题,结构体外排水系统(例如隧底设置排水管沟)还未真正落到实处。因此,需要一种新型衬砌结构体系,兼具隧底排水通畅、便于施工、维护等优点,并且能够适应岩溶及岩溶水的无规律性,以期降低贵南高速铁路乃至全国复杂岩溶地区铁路隧道的建设运营风险。

### 3 新型衬砌结构选型研究

经过调研发现,目前部分岩溶隧道为降低水害风险,采用了仰拱深埋中心沟型衬砌,如图3所示,在隧道仰拱以下设置深埋的中心水沟,用于引排隧道周边及底部的地下水。存在的主要问题在于“施工困难、形态难控”,即隧道仰拱开挖后在其中部位置继续下挖2~3 m,施工干扰较大,深埋水沟形态难以保证;“检修困难、维护缺失”,即岩溶地区地下水在排水系统中常形成堵塞,需要及时维护,即使在隧道纵向设置检查井,由于天窗时间有限,作业空间狭小等问题,也存在运维上的缺陷。

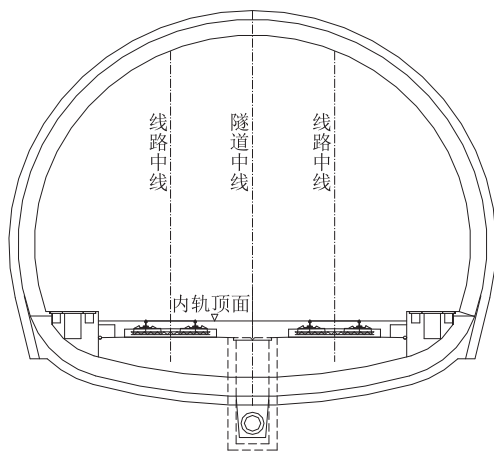


图3 仰拱深埋中心沟型衬砌结构示意图

为彻底解决上述问题,中铁二院工程集团有限责任公司研究提出了如图 4 所示的底板型箱体排水型衬砌结构,在两侧边墙底设置箱型基础兼做集排水廊道,用于引排隧道周边及隧道底部的岩溶水、地下水,在箱体之间设置底板连接,通过两侧箱体的刚度,保证结构稳定。底板型箱体排水型衬砌结构有以下优点:

- (1) 隧底泄水快,排水路径短

在衬砌边墙底部设置箱型基础兼集排水廊道,环向盲管可直接弯入箱体中,箱体内部也可直接设置泄

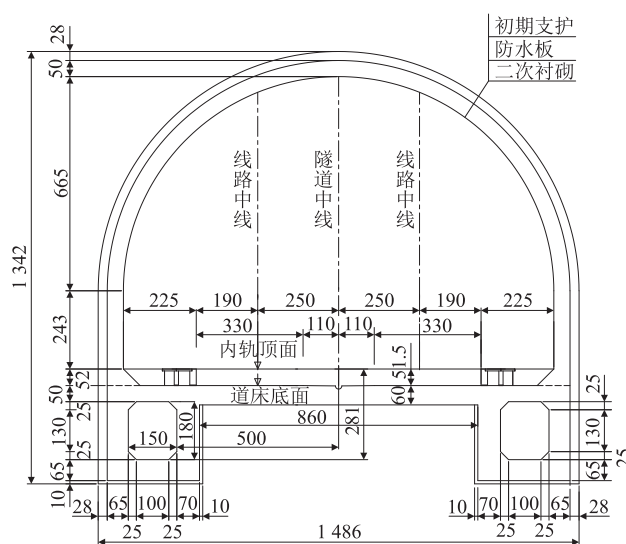


图4 底板型箱体排水型V级衬砌结构示意图(mm)

水孔,隧道周边岩溶水、地下水可以快速高效的引入箱体并快速排走,具有泄水速度快,排水路径短的优点。

- (2)排水空间大,泄水能力强

底板型箱体排水型衬砌在两侧边墙底部设置的箱体基础兼集排水廊道,其内净空为 1.5 m(宽)×1.8 m(高),远大于传统侧沟或中心沟尺寸,排水空间保证了足够的泄水能力。

- ### (3) 检修空间大,运营维护容易

两侧边墙底部设置箱体的净空空间,可以满足运营期间的检修、维护要求,通过设置检查井、检查洞室等方式,达到隧道衬砌方便检修,便于维护的要求。

- (4)施工干扰小,现场施作快

在兩側邊牆底部設置箱型基礎,不對隧道中部構成影響,施工車輛可在隧道中部通行,快速進行開挖、出渣、支护等作業,對施工干擾較小,便於施工組織,施工現場易於實施。

“底板型箱体排水型衬砌”相比于“仰拱深埋中心沟型衬砌”,排水能力更强,结构更加稳定,运营维护更加便捷,施工现场更易实施。下文基于“底板型箱体排水型衬砌”的构造特点,进一步对其结构稳定性、围岩稳定性和泄水能力等因素进行理论分析。

#### 4 底板型箱体排水新型衬砌结构理论研究

为分析底板型箱体排水新型衬砌结构的受力特征、围岩稳定性、泄水能力等因素,采用通用有限元分析软件 ANSYS,建立实体模型,以 V 级围岩深埋荷载为例,进行结构理论分析,采用通用有限差分软件



Flac3d,建立泄水数值模型,进行泄水能力分析。

4.1 力学性能分析

(1) 计算模型

采用 SOLID 65 单元来模拟结构衬砌,采用弹簧模拟地基土等抗力作用。在建模时,取 3 m 洞身为研究对象,将钢筋视为分布于整个衬砌单元中,和混凝土作为整体式单元考虑。衬砌底部作地基弹簧,并沿洞身均匀布置,有限元模型如图 5 所示。

(2) 参数选取

根据现行 TB 10003 - 2016《铁路隧道设计规范》中规定,以 V 级围岩为例,进行结构受力分析(考虑该衬砌为排水型衬砌,计算中仅考虑 V 级围岩荷载,未考虑水压力),材料物理力学参数如表 5 所示。

(3) 计算结果

根据计算结果,新型衬砌的竖向变形、第一主应力、第三主应力、基底塑性区、内力分布图、结构安全系数如图 6 所示。

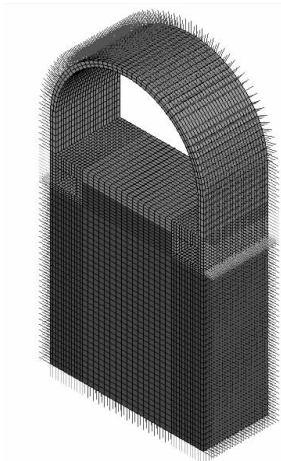


图 5 新型衬砌结构计算有限元模型图

表 5 衬砌结构计算参数表

项目	密度 /(kg/m³)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
V 级围岩	1 900	1.5	0.4	23	0.12
二次衬砌	2 500	32.25	0.2	—	—

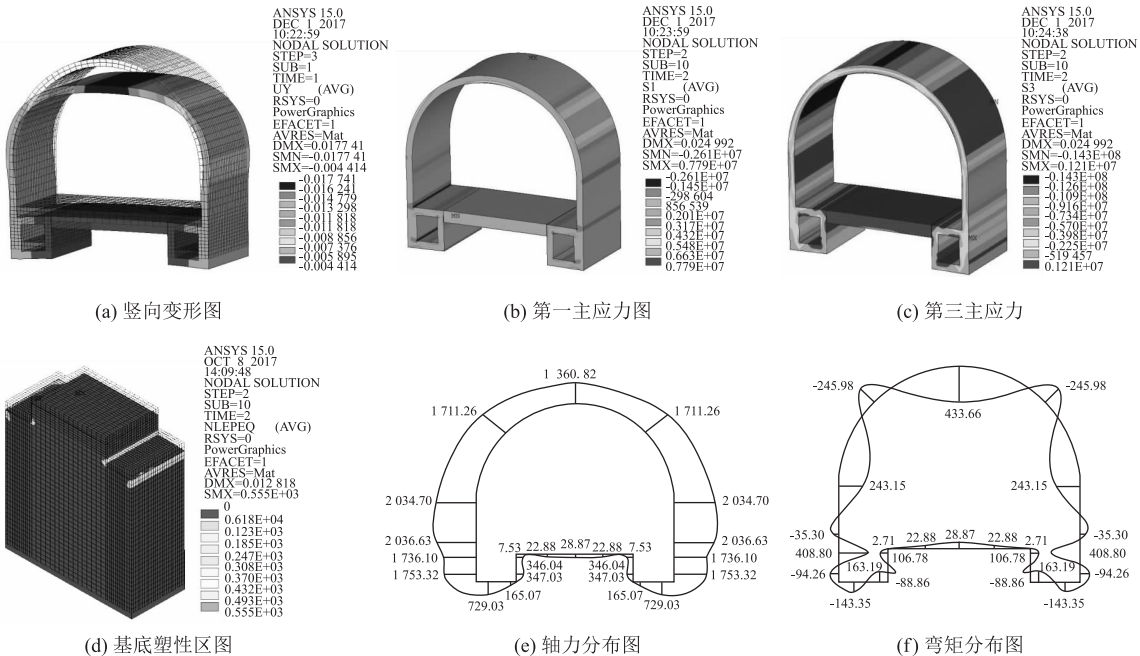


图 6 新型衬砌结构理论分析结果图

(4) 与传统底板型衬砌受力对比分析

为进一步分析底板型箱体排水新型衬砌力学性能,在同样荷载情况下,与传统底板型衬砌力学性能进行对比分析,结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出:

①新型衬砌结构的最大位移发生在拱顶位置处,为 1.77 cm,底板竖向位移值为 6.77 mm,理论计算值与传统仰拱型衬砌计算结果接近,可以看出,新型衬砌

结构具有良好的稳定性。

②新型衬砌结构的最大第一主应力(拉)发生在拱顶内侧,为 7.79 MPa,与传统仰拱型衬砌计算结果接近;新型衬砌结构最大第三主应力(压)出现在拱顶外侧、拱腰内侧,最大值为 14.4 MPa,均小于混凝土抗压强度设计值,可看出新型衬砌结构具有良好的应力状态。

③新型衬砌基底塑性区的最大值为 0.555E - 03,

表 6 新型箱体衬砌与传统底板衬砌计算结果对比表

项目		轴力 /kN	弯矩 /kN	偏心 情况	K 计 算值	K 容 许值	判别
拱顶	箱型	1 361	434	大偏心	3.3	2	安全
	底板	1 445	327	大偏心	4.0	2	安全
拱腰	箱型	1 711	-246	小偏心	30.2	2	安全
	底板	1 942	-290	小偏心	39.9	2	安全
拱脚	箱型	2 035	243	小偏心	20.5	2	安全
	底板	2 156	29	小偏心	9.0	2	安全
墙脚	箱型	2 037	-33	小偏心	11.3	2	安全
	底板	2 265	-500	大偏心	3.6	2	安全
仰拱左侧	箱型	8	3	大偏心	14.2	2	安全
	底板	1 669	258	小偏心	34.7	2	安全
仰拱中部	箱型	29	78	大偏心	4.7	2	安全
	底板	1 669	199	小偏心	25.0	2	安全

最大塑形应变发生内墙外侧底部土体处整体分析可以看出,新型衬砌的塑性区较小且塑形应变较小,结构整体受力合理基底稳定性良好。

④从新型衬砌结构的内力图和弯矩图中可以发现,新型衬砌的最大轴力则出现在边墙处,为 2 036.63 kN,最大弯矩则出现在箱体外墙处,为 408.80 kN·m。从弯矩的分布来看,新型衬砌截面的弯矩反弯点出现在拱腰等位置处,最大弯矩差值为 679.64 kN·m,内力分布良好。

⑤与传统底板型衬砌受力分析相比,新型衬砌结构隧道拱部与传统底板衬砌受力情况相似,新型衬砌由于两侧箱体的刚度较大,拱脚与墙脚的受力情况优于传统底板型,底板中部由于新型衬砌所受轴力较小,安全系数较传统底板型有所降低。新型衬砌各处安全系数均满足规范安全要求,且富余量较大,结构整体稳定性较高。

4.2 渗水能力分析

(1) 模型概况

为分析底板型箱体排水新型衬砌结构的泄排水能力,与“传统衬砌 + 泄水洞”模式的泄水能力进行对比,采用 Flac3d 软件建立Ⅳ级围岩中新型衬砌结构泄水模型和“传统衬砌 + 泄水洞”模式泄水模型,如图 7 所示。考虑边界效应,对于新型衬砌模型,隧道外侧距离左右边界为 30 m,上边界为 60 m,下边界为 15 m,纵向长度为 10 m,计算模型如图 8 所示;对于“传统衬砌 + 泄水洞模型”,隧道外侧距离左右边界为 60 m,上边界为 60 m,下边界为 15 m,纵向长度为 10 m。

(2) 参数设置

对于力学边界,模型上端为自由边界,底部位移垂直约束,两侧水平位移约束,沿隧道轴线前后方向水平约束。

对于渗流边界,模型上下、左右边界为透水边界且

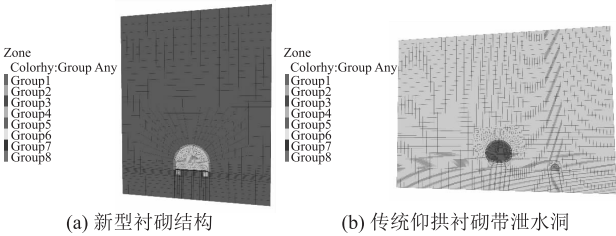


图 7 新型衬砌结构渗水能力分析有限元模型图

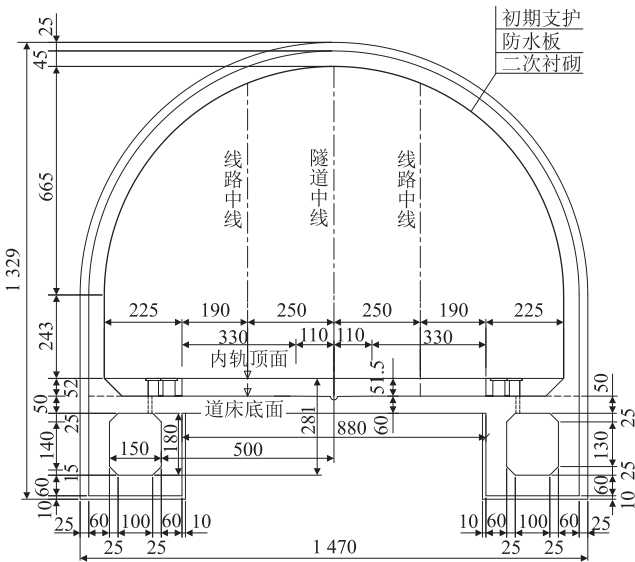


图 8 底板型箱体排水型Ⅳ级衬砌结构示意图 (mm)

采用固定孔隙水压力,沿隧道纵向的前后边界为自由边界。初始空隙水压力为按重力场梯度分布的静水压力。

采用Ⅳ级围岩参数进行计算,参数选取如表 7 所示。

表 7 渗水模型计算参数

项目	$E$ /GPa	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
Ⅳ级围岩	3.0	22	0.3	30	0.35

(3) 计算结果

两种泄水模型的孔压等值线图、衬砌背后孔压示意如图 9 所示。

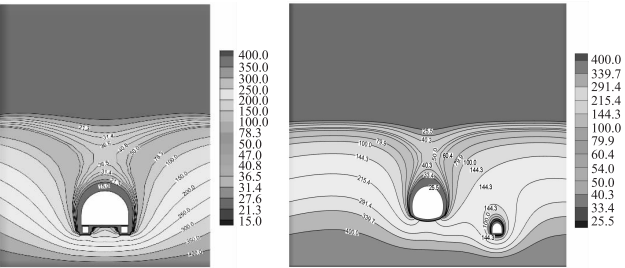


图 9 新型衬砌结构渗水能力分析结果图

为更直观的比较两者的排水能力,按平均水压进行计算,即通过提取隧道衬砌背后单元的孔压、单元体积等数据,经过积分求得在隧道纵向上单位长度所受的全部水压,除以隧道环向周长可得出在隧道纵向、环向上单位长度的衬砌背后平均水压,计算结果如表 8 所示。

表 8 排水后衬砌平均水压表

排水结构	地层隧周 初始水压/kPa	排水后支护结构背后平均水压/kPa			
		拱顶	拱腰	拱墙	隧底
传统泄水洞	3 × 10 <sup>5</sup>	12.0	19.8/15.6	21.4/16.7	30.1
底板箱体型		4.3	7.5	8.7	9.6

根据计算结果可以看出:  
(1)新型衬砌结构排水分布形式更优  
新型衬砌结构衬砌背后水压力沿隧道轴线对称分布;而传统泄水洞结构正洞衬砌背后水压力由于受一侧泄水洞影响,远泄水洞侧水压力比近侧高 30% 左右,呈明显偏压状态。

(2)新型衬砌结构排水泄压能力更强  
采用新型衬砌结构后,隧道衬砌拱顶平均水压为 4.3 kPa,为传统泄水洞 12.0 kPa 的 35.8%;衬砌拱腰平均水压为 7.5 kPa,为传统泄水洞 15.6 kPa 的 48.1%;衬砌拱墙平均水压为 8.7 kPa,为传统泄水洞 16.7 kPa 的 52.1%;隧道底部平均水压为 9.6 kPa,为传统泄水洞 30.1 kPa 的 31.9%。新型衬砌结构衬砌背后残余水压比传统泄水洞结构更小,可见新型衬砌结构的排水能力优于传统泄水洞。

5 结论及建议

本文以贵南高速铁路隧道为研究背景,研究提出了底板型箱体排水新型衬砌结构,主要研究结论为:  
(1)由于岩溶的复杂性、岩溶发育的不规律型,复杂岩溶地区隧道建设风险高,贵南高速铁路岩溶隧道具有岩溶强烈发育、洼地隧道关联、季节变动带长等特点,隧道岩溶水害风险较高。  
(2)传统岩溶隧道设计存在隧底积水无法引排、排水系统易于堵塞、雨季排水能力不足等问题,设置隧道边墙泄水孔、采用抗水压衬砌、配置泄水洞等传统措施均存在一定问题。  
(3)基于现行岩溶隧道衬砌结构防排水方面存在的问题,本文提出的“底板型箱体排水新型衬砌”,具有“泄水快、宜维护、便施工”等特点,能够很好地适应贵南高速铁路复杂岩溶地区的地质情况。  
(4)底板型箱体排水新型衬砌结构在变形控制、

应力状态、基底稳定性、内力分布及安全性系数方面均具有良好性能,相对于传统的配置泄水洞方案,其排水分布形式更优、排水泄压能力更强。  
(5)建议进一步加强底板型箱体排水新型衬砌结构体系的研究,包括初支支护体系、二衬钢筋布设、防水体系、施工工法体系、运维检修体系等,并在贵南高速铁路岩溶隧道中选择适合的工点,开展现场试验段研究,相关成果可推广至其他复杂地区的岩溶隧道工程。

参考文献:

[1] 邓勇,山岭隧道施工地下水灾害及治理技术[J]. 高速铁路技术, 2019,10(6):77-81.  
DENG Yong. Groundwater Disaster and Control Technology in the Construction of Mountain Railway Tunnel[J]. High Speed Railway Technology,2019,10(6):77-81.  
[2] 何华武,曾强运. 复杂艰险山区地质勘察及选线技术[J]. 中国工程科学, 2009, 11(12): 9-12.  
HE Huawu, ZENG Qiangyun. Miscellaneous Dangerous Mountain Geological Survey and the Line Selection Techniques[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(12): 9-12.  
[3] 中铁二院集团有限责任公司. 新建贵阳至南宁高速铁路岩溶隧道结构设计专题报告[R]. 成都: 中铁二院集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd. Special Report on the Structural Design of the Newly-built Guiyang-Nanning High-speed Railway Karst Tunnel [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd., 2017.  
[4] 张民庆,刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水特征分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 422-426.  
ZHANG Mingqing, LIU Zhaowei. The Analysis on the Features of Karst Water Burst in the Yuanliangshan Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 422-426.  
[5] 张梅,张民庆,孙国庆. 宜万铁路野三关隧道高压富水充填溶腔溃口处理技术[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 81-86.  
ZHANG Mei, ZHANG Mingqing, SUN Guoqing. Technology for Treating Burst Port of Filling Solution Cavity with High-Pressure and Rich Water of Yesanguan Tunnel on Yichang-Wanzhou Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 81-86.  
[6] 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 Larst Cavity in Zhushabao No. Two Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 91-96.  
[7] 叶堃. 新建成贵线玉京山隧道岩溶大厅综合治理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
YE Kun. Study on the Comprehensive Treatment of Karst along the Tunnel of Chengdu-Guizhou Newly-Built Railway Line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

依赖于其他测绘仪器,直接使用智能平板完成数据采集,进一步减轻了外业工作的负担。

(4)能实时定位当前测量人员的位置,提供移动位置服务,自动引导测量人员准确到达放样点进行数据采集,有效减少了放样时实际位置的调整次数和时间,极大提高了作业效率,经统计其工作效率提高30%左右。

## 5 结论

(1)基于移动智能平板的中线放样程序,其设计思想符合当前测绘领域逐步从传统人工作业、数字作业模式转型为数字智能、移动采集、高度可视化的作业模式,能够有效提高野外数据采集质量和效率,能很好地减轻测量人员的作业强度和负担。

(2)采用移动智能平板进行铁路放样测量,其精度满足铁路工程测量规范要求。

(3)移动智能设备逐步取代传统的测量模式,随着移动智能平板在铁路勘测领域的应用,必将提高移动测绘技术在铁路勘测领域的技术水平。

随着移动智能设备、多星定位技术、COSR 网络RTK、5G/6G 移动通信技术的进一步发展,未来会有更多、更全面、更专业的移动智能测绘设备和软件系统服务于测绘以及铁路勘测设计领域,以提高铁路勘测设计信息化建设,并进一步改善测量人员的作业条件,真正做到外业测量的可视化、轻便化、自动化、智能化。

## 参考文献:

- [1] 王大刚. 铁路中线测量数据自动化处理和质检方法研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(6): 17-21.  
WANG Dagang. Research on Automatic Processing and Quality Inspection of Railway Midline Measurement Data [J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(6): 17-21.
- [2] 周玉辉. 铁路勘测数字化采集系统软件开发研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(2): 26-29.  
ZHOU Yuhui. On Software Development for Digital Collection System

of Railway Survey [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(2): 26-29.

- [3] 胡海潮, 吴剑, 彭小伟. 基于 android 平板的国土行业外业采集系统设计与实现[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(4): 688-692.  
HU Haichao, WU Jian, PENG Xiaowei. Design and Implementation of Land Industry Data Acquisition System Based on Android System [J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(4): 688-692.
- [4] 李文, 曾珍, 陈祥方. 基于移动智能平台的公路勘测野外数据采集系统的设计与实现[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(2): 290-292.  
LI Wen, ZENG Zhen, CHEN Xiangfang. Design and Implementation of Data Acquisition System for Highway Survey Field Based on Mobile Intelligent Platform [J]. Journal of Guizhou University of Finance and Economics, 2018, 14(2): 290-292.
- [5] 陈轮. 基于平板电脑的测绘成果外业巡检系统研究与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(3): 185-187.  
CHEN Lun. Research and Implementation of Mapping Results Field Inspection System Based on Tablet Computer [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(3): 185-187.
- [6] 李涛. 关于高速铁路 CORS 建设的思考[J]. 全球定位系统, 2014, 39(2): 68-70.  
LI Tao. The Reflections on CORS Construction of High Speed Railway [J]. GNSS World of China, 2014, 39(2): 68-70.
- [7] 张运华. GPS 连续参考站系统(CORS)在铁路定测中的应用研究[J]. 铁道勘察, 2015, 41(1): 22-23, 26.  
ZHANG Yunhua. Research and Application of Continuous Operating Reference Station(CORS) in Railway Final Surveying [J]. Railway Investigation and Surveying, 2015, 41(1): 22-23, 26.
- [8] 郭江. CORS 系统应用于铁路勘测的适用性研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(4): 45-47.  
GUO Jiang. Application of CORS System to Railway Survey [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 18(4): 45-47.
- [9] TB 10601-2018 铁路工程测量规范[S].  
TB 10601-2018 Code for Engineering Survey of Railway [S].
- [10] 张磊. 基于云计算的勘察设计信息化建设初探[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 46-49.  
ZHANG Lei. Discussion on Information Construction of Exploration and Design Based on Cloud Computing [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 46-49.

(上接第39页)

- [8] 张会刚, 张广泽, 喻洪平, 等. 沪昆客专麻拉寨隧道岩溶发育规律及突水原因探析[J]. 路基工程, 2017(1): 208-212.  
ZHANG Huigang, ZHANG Guangze, YU Hongping, et al. Analysis of Karst Development Law and Water Burst Cause of Malazhai Tunnel in Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Railway [J]. Subgrade Engineering, 2017(1): 208-212.

- [9] 邹陈, 张广泽, 毛邦燕. 沪昆客专白岩脚隧道突水致灾机理分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 46-50.  
ZOU Chen, ZHANG Guangze, MAO Bangyan. Analysis of the Mechanism of Water-Inrush of Baiyanjiao Tunnel in Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 46-50.