

# 陡壁地形极小净距隧道小导洞扩挖出洞技术

吴哨兵<sup>1</sup>, 许召强<sup>2</sup>, 陈进<sup>1</sup>, 周中书<sup>1</sup>, 张学民<sup>2\*</sup>, 阳军生<sup>2</sup>

(1. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵州 贵阳 550008; 2. 中南大学 土木工程学院)

**摘要:**贵州兴义环城高速公路旧屋基隧道工程出口位于陡壁峡谷,无进洞施工条件,针对隧道具体地形和地质条件,提出了极小净距条件下先行洞台阶法出洞,后行洞采用小导洞先贯通然后扩挖出洞技术。该文介绍了出洞施工整体方案、施工工艺、工序和施工过程,并结合围岩变形监测结果验证了出洞施工效果。结果表明:在中间最小岩柱仅0.6 m条件下,后行洞采取小导洞先贯通、后扩挖施工对于先行洞围岩和结构影响较小,衬砌结构安全,取得了良好技术经济效果,是陡壁极小净距隧道出洞的一种可行方法。

**关键词:**极小净距隧道;出洞施工;台阶法;小导洞;扩挖

## 1 引言

随着中国交通基础设施建设的发展,中国西南高原山区修建的隧道数量、长度迅速增长。部分隧道所处地形越来越复杂,有的隧道进口、出口均位于悬崖峭壁或陡坡之上,沟谷深切,修建施工便道困难,导致机械无法到达,不具备建立施工平台的条件,因此,大多数情况下采用单向出洞方案。

何川研究了不同隧道埋深以及不同岩柱加固措施对小净距隧道中夹岩墙受力、变形特点的影响,为小净距隧道的支护设计、开挖方式、岩墙加固方式选取等提供了指导;邓少军等对连拱隧道典型断面在不同施工顺序下的施工力学行为进行了模拟计算,提出了开挖方案并获得应用;李君君等对柱状节理特性下小净距隧道开挖进行模拟,研究了隧道失稳模式以及中岩柱的稳定性,得出锚杆可增大层间节理剪切刚度,抑制中岩柱节理面,提高小净距隧道整体稳定性;刘亮讨论了高速公路小净距隧道较其他形式隧道的优越性及其适用条件,同时分析了在不同等级围岩条件下小净距隧道的最佳开挖方法。隧道单向出洞方面有许多类似成功经验,向海清介绍了软弱不均匀地层大断面隧道小导洞出洞方案,很好地控制了围岩变形;王远奇简述了隧道施工中单向出洞方式的优点,从施工动态设计、辅

助措施、开挖方式等方面,探讨了单向出洞的施工关键技术;高峰结合福建省八浦隧道工程,介绍采用顶设导洞、单向掘进贯通的施工方法,有效解决了隧道洞口设计在陡峭悬崖无工作场地的难题。截至目前,关于极小净距隧道超前导洞安全出洞施工法的研究较少。

该文以贵州兴义环城高速公路旧屋基极小净距隧道为背景工程,结合隧道传统贯通方式的工程经验和现场实际,先行洞采用台阶法直接出洞,后行洞采用超前小导洞出洞,此外,取消设计长管棚,改用双层小导管超前支护单向掘进,对洞口边仰坡实现零开挖出洞,以最大限度保护生态环境。

## 2 工程概况

旧屋基隧道原设计为分岔隧道,进口段左右洞净距约为30.5 m,然后逐渐分为分离式、小净距、连拱隧道,围岩主要为强、中风化白云岩(V级),节理裂隙发育。出口位于陡壁斜坡,坡下为马岭河大峡谷,不具备进洞施工条件。两隧道线路位置关系如图1所示。

连拱隧道施工段落长度为45 m(ZK15+646~ZK15+691/YK15+632~YK15+677),其中洞口段衬砌结构设计如图2所示,采用传统的先进行中导洞开挖、中隔墙施工,再左右洞施工,工序复杂,且该隧道不具备施工条件。通过优化论证,连拱隧道段改为双

收稿日期:2020-04-14(修改稿)

基金项目:贵州省工业和信息化发展专项资金计划技术创新项目(编号:2017018)

作者简介:吴哨兵,男,大学本科,高级工程师。E-mail:422267448@qq.com

\*通信作者:张学民,男,博士,副教授。E-mail:363200637@qq.com

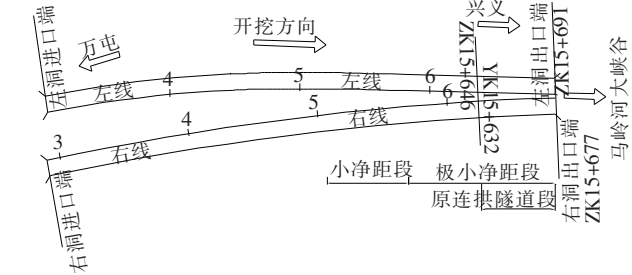


图1 隧道路线平面示意图

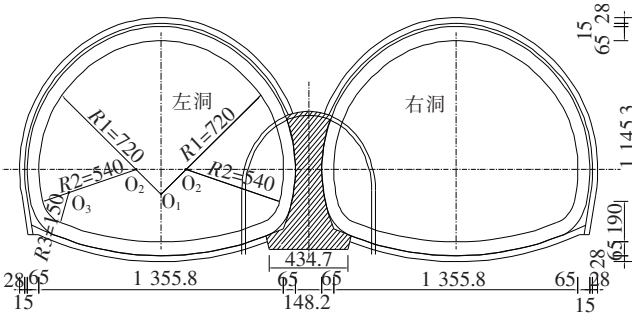


图2 原连拱隧道洞口段衬砌结构设计图(单位:cm)

洞单独施工,左右洞间距从起始端 8.4 m 至出口端 0.6 m。隧道左线起讫里程为 ZK15+305~ZK15+697(含 6 m 明洞),右洞起讫里程为 YK15+290~YK15+683(含 6 m 明洞),单洞开挖跨度为 15.72 m,高度为 11.45 m,开挖面积约为 130 m<sup>2</sup>。由于隧道出

口坡面较陡,施工场地不足,交通不便,故采用单向直接出洞法施工。由于出口洞段围岩整体破碎,节理裂隙发育,且坡度较陡,出洞面临洞口边仰坡失稳风险,而且隧道出口下方马岭河大峡谷为国家级风景区,环境保护要求高,施工时禁止块石、危石掉落。左、右线隧道出洞施工安全和洞口边仰坡稳定性尤为重要。

### 3 隧道出洞方案选择

采用对“中岩柱”加固处理和采用“控制爆破”对左右洞错位开挖法相结合的施工工艺,即为先行洞左洞“台阶法出洞”,后行洞右洞“小导洞出洞,后断面扩挖”的单向出洞开挖技术。其中,左洞先行出洞后,二衬采用“跳打”方式先行施作洞口段 9 m 二衬,右洞开挖采用爆破与冷挖结合的方式,开挖时必须注意对中间岩柱的保护。开挖后及时进行支护,特别是靠近岩柱一侧岩体,必要时可增加临时支撑或增加支护强度。此出洞方案施工进度快,成本相对较低,还可以最大程度减小后行洞爆破对于先行洞结构的影响,保证施工安全。

左右洞具体开挖尺寸及支护设计如图 3 所示,左右洞出洞施工工序如图 4 所示。

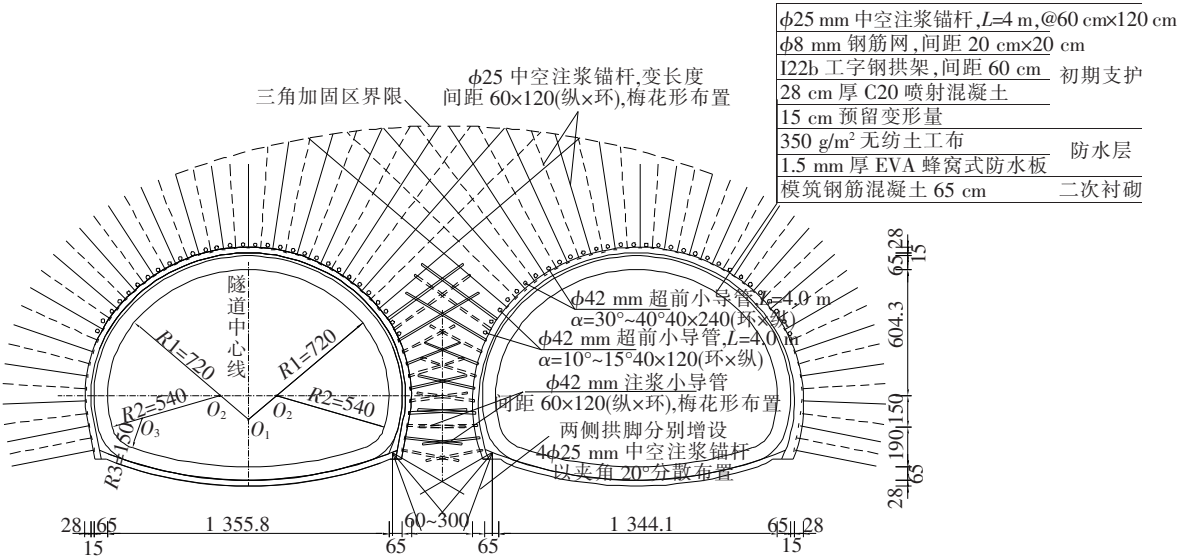


图3 隧道Ⅴ级围岩段支护结构图(单位:cm)

根据施工进度,出洞施工步骤如下:  
(1) 左洞台阶法开挖①部分,同时施作②初支。  
(2) 左洞贯通后,移动左洞二衬模板台车至洞口,施作③洞口段二衬。  
(3) 施作左洞其余段二衬④,同时开挖右洞小导

洞⑤。  
(4) 右洞小导洞超前掌子面一定距离后,扩挖右洞⑥部分,同时施作初支⑦。  
(5) 最后施作右洞其余段二衬⑧。

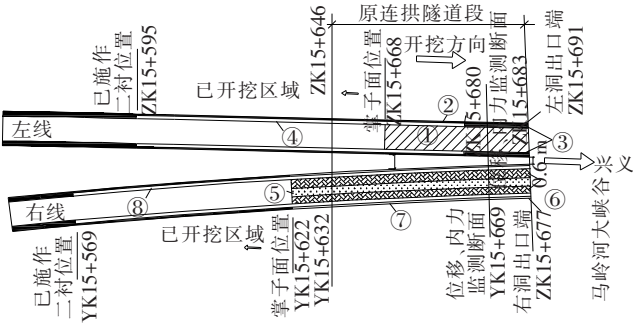


图 4 出洞方案施工工序示意图

4 先行洞台阶法出洞

4.1 开挖与支护

隧道左洞为先行洞台阶法出洞,采用弱爆破、机械开挖结合的方式。

两台阶法开挖时,控制上台阶高度为 7.2 m,面积为 86 m<sup>2</sup>;下台阶高度为 2.7 m,分左右两侧开挖,单侧开挖面积为 22 m<sup>2</sup>。三台阶法开挖时,控制上台阶高度 3~4 m。出口段循环进尺与开挖方式控制如表 1 所示。

表 1 左洞出口段施工控制表

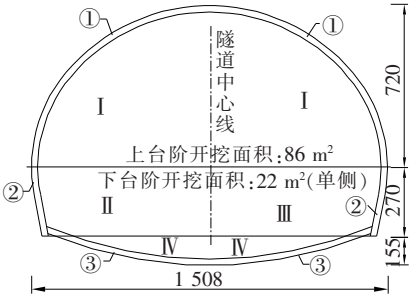
距离洞口 长度/m	循环进 尺/m	左右洞 净距/m	采用开挖方法
20~15	2.4	1.79~1.48	两台阶法开挖,上台阶高度 7.2 m
15~10	1.8	1.48~1.17	两台阶法开挖,上台阶高度 6.8 m
10~5	1.2	1.17~0.88	三台阶法开挖,上台阶高度 3~4 m,弱爆破
5~0	0.6	0.88~0.59	三台阶法开挖,上台阶高度 3~4 m,机械开挖

其中,两台阶法施工工序流程图如图 5 所示。首先开挖上台阶 I 断面,施作①上台阶初期支护,开挖下台阶左侧 II 断面,施作②初期支护,开挖下台阶右侧 III 断面,施作②初期支护,开挖 IV 仰拱,施作初期支护③。

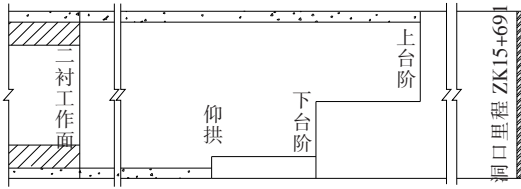
为了规避地质条件的差异性带来的风险,左洞出口段施工时实行超前探孔与超前水平钻孔预报措施。分别在隧道初支、掌子面处施打径向、水平向探孔,孔径为 38 mm,长度  $L>5.0$  m,其中,径向探孔每 2 m 探测一次,水平向探孔每 5 m 探测一次。此外,还使用潜孔钻在上台阶中心位置施钻  $\phi 127$  mm 钻孔,探

测前方地质情况与距离出口长度。

左洞出洞后,施作洞口段二衬,保证洞口安全。



(a) 施工工序横断面图



(b) 施工工序纵断面图

图 5 左洞两台阶施工工序图(单位:cm)

4.2 超前支护与注浆加固

出口段采用直径为 42 mm、厚度为 4 mm、长度为 4 m 的双层小导管作为超前支护措施。其中一层外插角度为 10°~15°,环向间距为 40 cm,纵向间距为 120 cm,另一层小导管外插角度为 30°~40°,环向间距为 40 cm,纵向间距为 240 cm。小导管前端做成尖锥形,尾部焊接  $\phi 8$  mm 钢筋加劲箍,管壁上每隔 10~20 cm 进行梅花形钻眼,眼孔直径为 6~8 mm,尾部长度不小于 30 cm 作为不钻孔的止浆段。严格控制安装与注浆质量。

采用梅花形布置的注浆小导管进行注浆加固,可有效加固中间岩柱,提高其强度及刚度,减少因隧道间距小而导致围岩变形以及爆破震动等不利因素,满足超小净距隧道中岩柱特有的加固要求(对于低类别围岩,对岩柱进行注浆加固效果较好)。浆液采用 1:0.7 普通水泥浆液,注浆压力控制为 1.0~1.5 MPa,使松散的块石碎石状岩体固结,提高中壁岩柱的承载能力;另一方面,出口段两隧道间上方三角区岩体自稳性能较差,现场采用延长注浆锚杆加固方式提高该区域的稳定性。

5 后行洞小导洞出洞施工

5.1 小导洞施工

右洞出口段(YK15+646~YK15+677)出洞施工

受左右线极小净距的影响较大,采用超前导洞出洞方案,导洞先行贯通后扩挖,最终实现安全出洞。

右洞开挖上台阶掌子面中部设置超前导洞,尺寸为 $7\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。出口段 $10\text{ m}$ 内设置小导洞初期支护,支护参数为:钢架采用 I14b 工字形钢拱架,间距为 $80\text{ cm}$ ;钢筋网直径为 $8\text{ mm}$ ,网格间距为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ ;喷射 C20 混凝土,厚度为 $15\text{ cm}$ 。

旧屋基隧道右线里程 YK15+632~YK15+677 段采用小导洞贯通出洞方式,导洞施工采用弱爆破开挖方式,每循环进尺 $1.6\text{ m}$ ,每日平均进尺 $3.2\text{ m}$ 。

5.2 主洞施工

右洞大断面施工至距离洞口 $20\text{ m}$ 时停止,采用弱爆破方式优先贯通超前导洞,导洞贯通后,主洞依然按照上下台阶法施工步骤单向向开挖掘进,上台阶大断面采用机械与爆破结合的方式扩挖。其中,靠近先行左洞一侧的岩体采用破碎头破除方式机械开挖,右侧远离左洞一侧岩体采用弱爆破方式开挖。上台阶扩挖完成后,逐段拆除超前导洞支护,及时施作主洞上台阶初期支护并对左侧中岩柱进行注浆加固。

其中,右洞初期支护参数及掌子面循环控制进尺与左洞相同;隧道超前钻探、超前支护、注浆加固等措施与左洞施工工艺相同。

右洞出口段最终施工工序流程如图 6 所示,超前导洞 I 首先贯通并施作支护①,然后进行大断面扩挖,其中每循环右侧首先采用控制爆破开挖断面 II,然后对冷挖侧(左侧)采用机械开挖方式开挖断面 III,施作

初期支护②,爆破法开挖下台阶断面 IV,施作初期支护③,最后开挖仰拱 V 施作仰拱初支④。

6 施工效果评价

6.1 实际施工进度、效果评价

右洞出口段采用超前导洞后扩挖法出洞施工,施工进度较快。小导洞每循环进尺 $1.6\text{ m}$ ,由于超前导洞为提前 $20\text{ m}$ 贯通,大断面扩挖时,围岩应力得到有效释放,减小了极小净距施工风险,每循环进尺 $1.2\sim 1.8\text{ m}$ ,由于扩挖时采用了左冷挖右爆破的快速施工方式,每天可工作 $2\sim 3$ 个循环。

右洞出洞完成后,实际施工日期比原施工组织计划日期提前 $15\text{ d}$ ,实际施工总工期比原连拱隧道计划工期缩短了 $46\text{ d}$ 。

6.2 初支变形监测

出洞施工时,于洞口段初支 ZK15+683、YK15+669 断面(对应于左右线同一横断面)设置位移变形监测点、应力监测点,监测初支的稳定性。

左洞先行洞隧道施工过程中,结合现场监测资料,隧道周边位移随时间的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出:隧道周边位移在 $30\text{ d}$ 后基本趋于稳定,隧道最大拱顶沉降累计值为 $13.96\text{ mm}$ ,最大水平收敛累计值为 $5.46\text{ mm}$ ,围岩变形均远小于规范规定值,处于可控范围内。

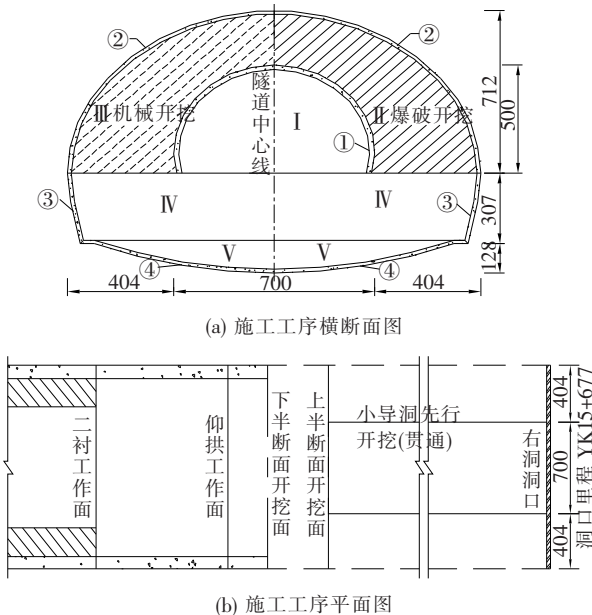


图 6 上台阶超前导洞施工设计及施工工序示意图(单位:cm)

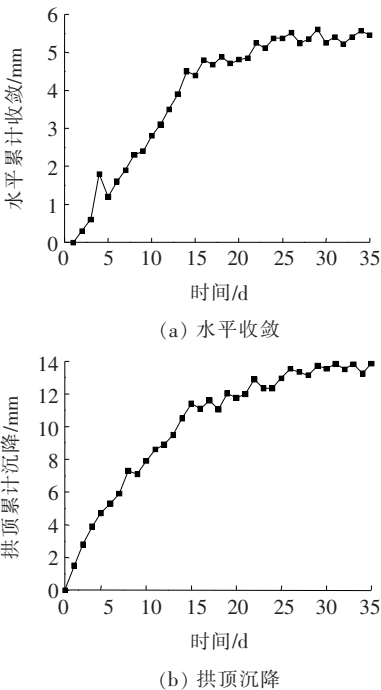


图 7 隧道 ZK15+683 断面周边位移时程曲线



后行洞隧道施工过程中,结合现场监测资料,隧道周边位移随时间的变化如图 8 所示。

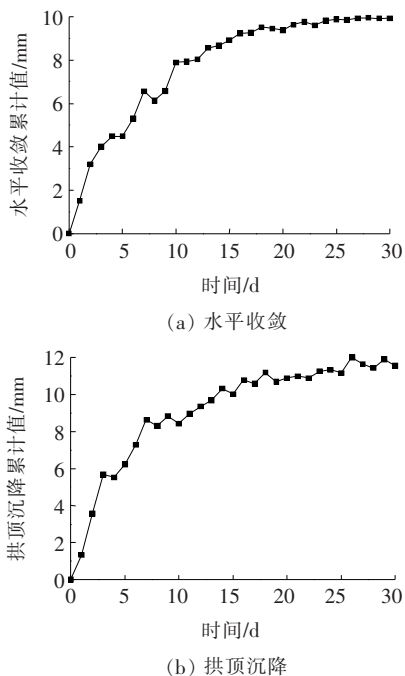


图 8 隧道 YK15+669 断面周边位移时程曲线

由图 8 可以看出:隧道周边位移在 15 d 后基本趋于稳定,隧道主洞扩挖施工的最大拱顶沉降累计值为 11.03 mm,最大水平收敛累计值为 9.43 mm,由此可知,隧道出洞口施工开挖满足围岩稳定性要求。

爆破振动测试结果表明:小导洞爆破施工引起右洞(先行洞)最大振动速度为 4.6 cm/s,扩挖施工引起最大振动速度为 3.4 cm/s,对于右洞衬砌结构安全无影响。现场实际监测表明:先行洞出洞、小导洞施工、后行洞施工过程中,隧道上方山体稳定,没有出现飞石落入峡谷的情况,中岩柱和洞口衬砌无裂纹,结构安全,取得了良好的效果。

## 7 结论

依托兴义环城高速公路旧屋基隧道出洞施工方案例,研究小导洞扩挖单向出洞技术在陡壁地形极小净距工况(洞口段为净距渐变段,最小间距为 0.6 m)下的可行性,得到以下结论:

(1) 通过对监测结果分析可知,左右线隧道初支最大拱顶沉降值为 13.96 mm,最大水平收敛值为 9.43 mm,且均在 30 d 后达到稳定;初期支护所受应力最大值为 216.59 MPa,左右线隧道断面内力均处于安全范围,施工效果较好。

(2) 陡壁极小净距隧道采用先行洞台阶法、后行洞超前小导洞法出洞可以有效控制围岩、初支变形,降低施工对于围岩、中岩墙的扰动,降低左右线初支发生破坏的可能性。该技术有效增强了中岩柱及上方三角区的岩体稳定性,证明该方案中支护措施可行。

(3) 通过对旧屋基隧道贯通出洞施工技术研究,得出该文提出的出洞施工方案可以有效解决隧道洞口施工空间不足、交通不便等问题。同时,该方案满足极小净距隧道施工的安全要求,降低了隧道的施工风险,适用于陡壁极小净距隧道出洞施工实际工程。

## 参考文献:

- [1] 姚勇,何川,谢卓雄. 双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 岩土力学,2007(9).
- [2] 邓少军,阳军生,张学民. 浅埋偏压连拱隧道施工数值模拟及方案比选[J]. 地下空间与工程学报,2005(6).
- [3] 李君君,王海彦,吕学科. 柱状节理偏压小净距公路隧道稳定性研究[J]. 中外公路,2017(2).
- [4] 刘亮. 高速公路小净距隧道建设关键技术分析[J]. 地下空间与工程学报,2009(z1).
- [5] 向海清. 软弱不均匀地层大断面隧道小导洞出洞施工技术[J]. 中外公路,2013(4).
- [6] 王远奇. 山区公路隧道单向出洞方式施工技术[J]. 山西建筑,2016(13).
- [7] 高峰. 隧道单向掘进出洞施工技术[J]. 市政技术,2012(s1).
- [8] 田志宇. 并行小净距隧道后行洞施工对先行洞的影响现场试验研究[C]. 2006 年四川省公路学会隧道学术交流会,2007.
- [9] 中南大学. 兴义环高旧屋基隧道极小净距段现场施工科研测试报告[R],2018.
- [10] 贵州省交通规划勘察设计研究院. 贵州省盘县至兴义高速公路(兴义支线)两阶段施工设计图(第三册)(旧屋基隧道)[Z],2017.