

DOI: 10.7672/sgjs2022090093

隧道下穿既有省道不稳定坡体微扰动施工技术研究*

李洋溢, 虞 杨, 秦鲜卓

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530000)

[摘要] 为解决山岭重丘区公路隧道下穿既有省道施工扰动问题,采用抗滑桩与锚索防护+拱盖法进洞+机械开挖与控制爆破+洞内支护加强措施的微扰动施工技术,并结合现场爆破振动监测数据,对施工参数进行控制,分析微扰动施工技术的合理性。工程实践表明,微扰动施工技术可减小对围岩的扰动,有利于隧道洞顶坡体稳定,保证隧道顺利贯通,且不对既有省道交通造成影响,具有良好施工效果。

[关键词] 公路;隧道;围岩;坡体;微扰动;施工技术

[中图分类号] TU74

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)09-0093-05

Study on Micro Disturbance Construction Technology of Tunnel Under Crossing Existing Provincial Highway Unstable Slope

LI Yangyi, YU Yang, QIN Xianzhuo

(Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: In order to solve the construction disturbance problem of highway tunnel under crossing existing provincial highway in mountainous hilly areas, the micro disturbance construction technology of anti slide pile and anchor cable protection, arch cover method, mechanical excavation and controlled blasting, strengthening measures of support in the tunnel is adopted. Combined with the on-site blasting vibration monitoring data, the construction parameters are controlled, and the rationality of micro disturbance construction technology is analyzed. The engineering practice shows that the micro disturbance construction technology can reduce the disturbance to the surrounding rock, which is conducive to the stability of the tunnel top slope, ensures the smooth connection of the tunnel, and does not affect the traffic of the existing provincial highway, so it has good construction effect.

Keywords: highway; tunnels; surrounding rock; slope; micro disturbance; construction

0 引言

随着西部地区公路建设的高速发展,修建高速公路面临的地形地质、环境条件越来越复杂。特别是西南部山岭重丘区,高速公路线位多需穿越崇山峻岭,需修建隧道。受制于地形地质条件,出现大量新建隧道工程与既有工程相互交叉的问题,已引起参建方的广泛关注。

特别的,当公路隧道下穿地方道路或省级道路时,受限于道路等级较低、工程造价与建设用地有限等因素,多数省道边坡较陡,且未设计专门的防护形式。在这种情况下,如果新建隧道工程与既有省道存在交叉,隧道施工较大的扰动可能会引起坡

体失稳滑塌,从而威胁原有道路行车安全与隧道结构安全,需采用合理可靠的隧道微扰动施工技术。

近年来,国内学者对不同地形地质条件下的隧道下穿既有道路施工技术和施工参数控制等问题进行了研究,如石扬钊等^[1]以六盘水—六枝高速公路茨冲隧道下穿既有沪昆铁路为例,详细分析新建公路隧道下穿既有铁路线施工技术与控制措施,并总结相关工程经验;周文^[2]以新大力寺隧道下穿S208公路段工程为背景,利用数值模拟对上下台阶法、三台阶法、CD法和双侧壁导坑法施工扰动情况展开研究,从而得到最佳施工方案;王伟兴等^[3]以延崇高速公路河北段杏林堡隧道工程为依托,详细分析隧道下穿S241省道面临的技术难题,并总结相关施工技术,通过监测数据对施工效果进行评估;范昌杰^[4]以杭州市第二水源千岛湖配水工程为背

* 广西科技计划(2021AB40119)

[作者简介] 李洋溢,副总工程师,高级工程师, E-mail: 68465309@qq.com

[收稿日期] 2022-01-10

景,结合隧道穿越 S305 省道工程特点,利用有限元软件对隧道施工引起的围岩、路面变形机理进行研究,并根据研究成果优化施工参数;林利安等^[5]根据金门隧道下穿既有省道工程,详细分析新建公路隧道下穿既有省道施工控制措施,并总结施工经验;邓启华^[6]以昆玉铁路宝峰隧道下穿高速公路为研究背景,全面研究新建隧道下穿既有公路的施工控制措施,并总结下一步改进和优化的方向;张耀双^[7]以石黔高速公路杉树坪隧道工程为例,研究了浅埋隧道下穿既有道路施工技术;侯晓鹤等^[8]对梧州市 207 国道项目毕村分离式立交桥施工方案进行分析,提出下穿既有高速公路分幅施工、强支护、浅开挖技术。

国内关于山岭重丘区公路隧道下穿省道不稳定坡体微扰动施工技术的研究较少,因此,本文以西南地区南丹至天峨下老高速公路向阳 2 号隧道下穿既有省道工程为例,对隧道下穿既有省道不稳定坡体微扰动施工技术与参数进行分析,并结合现场爆破振动监测数据,分析微扰动施工技术的合理性。

1 工程概况

南丹至天峨下老高速公路向阳 2 号隧道位于天峨县向阳镇,设计为分离式隧道,隧道线位总体呈东西走向。隧道左线起止桩号为 ZK80+085—ZK80+850,设计长度为 765m;隧道右线起止桩号为 K80+103—K80+862,设计长度为 759m。向阳 2 号隧道按双向四车道高速公路隧道标准设计,净宽 10.75m,净高 5.0m,进口段设计为端墙式洞门形式,洞口地形偏压严重。

隧道进口段下穿既有省道,埋深 2~4m。该省道是连接天峨县与乐业县的主要通道,道路交通不可中断。隧道洞顶上方坡体自然坡度为 35°~40°,无防护,不稳定,且存在滑塌痕迹,坡体主要由杂填土和强风化泥岩组成,自然斜坡稳定性较差。在隧道施工扰动、自然降雨等因素影响下,坡体有发生滑动的可能,进而影响省道与隧道洞内结构安全。隧道洞口下穿省道段周边环境要素如图 1 所示。

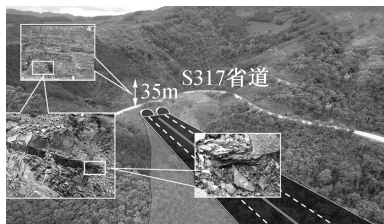


图 1 隧道洞口下穿省道段周边环境

质黏土,厚 2.5~3.5m,地表植被较发育。下伏基岩为灰黄色强风化与中风化泥质粉砂岩、泥岩,岩体呈薄~中厚层状,岩体较破碎,岩质较软。根据现场地质勘察报告,对隧址区地层相关特性参数进行统计,如表 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

岩土名称	变形模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	天然密度/ (kg·m ⁻³)
覆盖层	5	0.35	0	12.0	1.5
强风化泥岩	45	0.25	0	20.0	1.7
中风化泥岩	50	0.23	0	28.0	2.0

隧道进口段主要穿越强~中风化泥岩地层,呈浅灰色薄层状,为泥状结构,泥质胶结,层理倾角为 20°~35°。岩石风化强烈,结构可分辨节理裂隙发育,裂隙倾角为 50°~60°,岩质较软,岩芯呈碎块状,个别呈短柱状,钻进不稳定,泥浆消耗量大。该地层开挖暴露后,易发生软化崩解,围岩自稳能力差,在隧道施工扰动太大的情况下易引发拱顶塌方、大变形等问题,从而引起洞顶上方坡体滑移。

2 不稳定坡体微扰动施工技术

隧道下穿既有省道不稳定坡体时,采用抗滑桩与锚索防护+拱盖法进洞+机械开挖与控制爆破+洞内支护加强措施,以严格控制洞内变形,减小对围岩与坡体的扰动,保证隧道洞内结构安全,从而确保省道结构与行车安全。在隧道施工过程中,对周边环境进行实时振动监测,并及时反馈监测结果,合理调整施工参数,为隧道安全施工提供参考。

微扰动技术施工工序为:①在既有省道旁临时改路;②施作洞口抗滑桩,对仰坡进行防护;③利用拱盖法明挖施工既有省道段,施工完成后回填洞顶混凝土至既有省道面底部标高,恢复既有省道;④采用机械开挖与控制爆破相配合的方式开挖暗洞衬砌段。

2.1 抗滑桩与锚索防护施工

隧道进口段坡体属剥蚀中低山地貌,自然坡角为 30°~45°,地表横坡较陡,地表未见不良地质发育,坡体主要由杂填土和强风化泥岩组成,按土岩边坡考虑,自然斜坡稳定性较差,在暴雨季节地表水下渗及人工破坏等触发因素影响下,有发生滑动的可能。坡体岩层倾向总体向内,属于逆向边坡,对边坡稳定性有利。岩体呈薄层状且破碎,节理裂隙发育,软弱夹层发育,对坡体稳定性不利。边坡为省道挖方路堑边坡,整体高陡,坡面见局部滑塌。

综上所述,隧道洞口仰坡坡体整体稳定性较

隧址区第四系覆盖层为黄褐色硬塑状残积粉

差,边坡易发生折线型滑动破坏或局部滑塌,且坡脚位置为既有省道,重要性等级高,为避免隧道施工过程中坡体扰动引发滑塌,首先需考虑对坡体进行预加固。

结合坡体情况、施工场地、成本与工期等因素^[9],在省道边坡坡脚位置设置暗埋式圆形锚拉抗滑桩,抗滑桩直径 2.2m,中心间距 2.7~4.0m,桩顶设冠梁,并辅以预应力锚索进行加固,锚索长 25m,对应的抗拔力设计值为 450kN,锚索入射角设计为 20°,以形成整体性预加固支护体系,从而有效应对突发状况,保证坡体稳定。坡脚抗滑桩与预应力锚索防护体系如图 2 所示。



图 2 坡脚抗滑桩与预应力锚索防护体系

2.2 拱盖法进洞施工

本工程隧道洞口处于偏压斜交地形,如果采用常规进洞方式,将不可避免地对洞顶不稳定坡体产生较大扰动。为减小偏压地形对隧道洞口的影响,遵循“零开挖”原则,在最大限度上避免扰动坡体,充分适应地形,在隧道左、右线进口段均采用拱盖法进洞技术,即预留核心土开挖后,首先施作 9m 长斜交正作扩大型套拱及管棚,然后施作 5m 长正常段扩大型护拱,最后回填洞顶混凝土至既有省道面底部标高。

需注意,隧道左、右线须分开开挖,避免交叉施工相互干扰,待一侧回填完成且强度满足要求后开挖另一侧,待左、右线洞顶混凝土均回填完成且强度满足要求后出洞。

斜交正作段利用支挡结构平衡坡体下滑力的水平分力,将常规套拱调整为临山体端近平行于等高线的梯形套拱,以充分适应地形,在最大限度上减少山体开挖量,从而保证隧道洞顶坡体稳定。扩大型套拱内型钢按照扇形布设(见图 3),并采用 I14 加强套拱内型钢间的纵向连接,从而形成整体性强的格构体系,以增强结构整体受力性能。斜交正作段施工工序如下。

1)沿坡体等高线方向对坡体进行修整,形成隧道暗洞进洞立面,并进行坡面防护,沿扩大型套拱

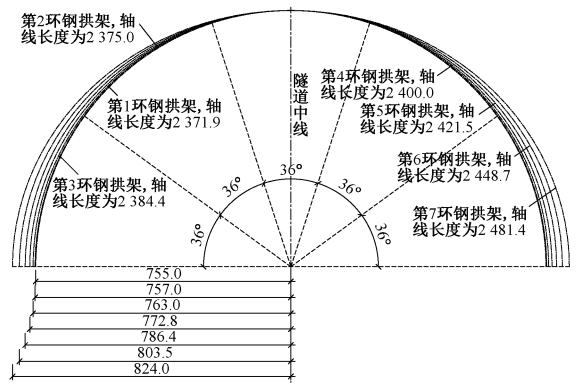


图 3 扩大型套拱内型钢拱架立面

结构边缘平行于隧道轴线方向开挖套拱基础,并浇筑支挡结构。

2)将隧道暗洞进洞立面走向与隧道轴线的夹角作为起始角(可微调),按扇形均匀布设扩大型套拱内型钢拱架,直至全部型钢拱架均垂直于隧道轴线。根据设计方案参数,一侧型钢水平间距大,另一侧型钢水平间距小。

3)靠近山体侧的型钢拱架拱脚采用锁脚钢管或锚杆进行固定,相邻型钢拱架肋采用环向等间距布置的型材进行焊接,以形成型钢拱架格构体系,并在型钢拱架外表面圆弧上等间距固定不同长度的导向套管,导向套管末端伸至山体成洞面。

4)架设套拱模板支架,拼装套拱模板,并采用拉杆固定,从而保证模板稳定。自两端向中心分层浇筑套拱,与混凝土支挡结构形成整体。浇筑完成后,对套拱混凝土进行养护。

5)施作等长管棚并注浆加固,管棚嵌入山体长度与导向管内长度之比宜 ≥ 1 。套拱及长管棚注浆加固效果达设计要求后,按照常规隧道暗洞施工方式进行开挖、初期支护和二次衬砌施工。

2.3 机械开挖与控制爆破施工

隧道悬臂铣挖机主要由截割头、铲板、输送带、机载除尘系统、履带行走系统组成,可集开挖、出渣、除尘、行走等多种功能于一体,实现隧道“冷开挖”掘进施工,具有对周边环境扰动小、掘进效率高的特点,在浅埋软弱围岩段的应用效果较好^[10-11]。同时,为提高隧道掘进效率,降低施工对坡体的扰动,将机械开挖与微差控制爆破技术相结合。

2.3.1 机械开挖

优先采用两台阶法施工,设备单次截割成型最大高度为 6.2m。将隧道悬臂铣挖机移至掌子面定位,沿着隧道开挖轮廓线,通过掘进机前端切割机构的摆动及切割头旋转破岩,破碎岩体通过设备前端铲板吸入洞渣输送系统,并通过输送系统直接卸

落至自卸车,由自卸车运输至洞外。当悬臂铣挖机在上台阶推进1个循环后,可立即进行初期支护施工。施工过程中还可根据隧道内岩层及粉尘情况,采用截割头喷嘴喷射水雾,采用自带的通风除尘系统除尘。

综合考虑经济因素等,本设备主要用于隧道IV~V级围岩开挖,为适应机械化施工并提高效率,开挖工法均改为短台阶法。对于隧道进口段V级围岩,首先切削环向周边围岩,然后预留核心土。进入暗洞段IV级围岩后,首先切削掌子面中心位置围岩,掏槽形成临空面,然后扩挖至周边轮廓。

现场统计数据表明,本工程隧道开挖施工速率平均可达 $25\sim 30\text{m}^3/\text{h}$,上台阶开挖进尺3m,需耗时7~9h,仅需2,3名施工人员,可有效避免大量人员聚集在掌子面,降低施工风险。与传统凿岩爆破工法相比,机械开挖无须使用炸药,避免爆破振动对隧道周边围岩的扰动,开挖后临空面完整稳定,无须施工人员清除拱顶危岩,施工安全高效,对于隧道超欠挖控制具有较好的效果,可节省50%以上湿喷料,绿色环保,更好地贯彻了绿色施工理念。

结合现场施工经验,对山岭重丘区公路隧道机械开挖施工关键要素进行总结:①需结合工程地质条件、结构与环境特点等,选择相匹配的机械设备、型号与工艺,必要时对机械设备及工艺进行改进;②须配备娴熟的机械操作人员与技术劳务团队,做好现场技术交底工作,并采用合适的劳务合作模式;③对混凝土、机制砂等材料配合比进行改进,选择合适的外加剂,更好地支持机械化作业;④合理制定机械设备所需配套设施与应急预案,如动力供应、配件供应、抢修应急措施等。

2.3.2 微差控制爆破

为解决传统掏槽爆破产生的振动较强问题,现场采用微差控制爆破技术降低爆破振动强度。首先在掌子面两侧采用铣挖机预掏槽,预留大直径空孔;然后将周边眼布置在大直径空孔两侧,以有效增大周边眼爆破临空面面积,使炸药起爆后的大部分能量可通过大直径空孔消散,减弱隧道爆破地震波传入地层中的强度,从而将隧道爆破地震波峰值速度有效控制在目标范围内。

隧道爆破过程中,通过减少每次装药量,合理控制每循环开挖进尺,并适当增加空孔数量与相邻炮孔延时时间,有效改善周边眼临空面条件,从而减弱隧道爆破地震波传播强度。

2.3.3 爆破振动监测

为探明机械开挖与控制爆破施工对隧道洞顶

坡体的扰动是否超出风险可控范围,在隧道爆破过程中进行振动监测,并实时反馈监测结果,及时调整施工参数。按照GB 6722—2014《爆破安全规程》有关要求,分析洞口上方坡体可承受的爆破振动强度,确定隧道爆破振动强度监测控制标准。本工程按永久性岩石高边坡标准,当主振频率 $\leq 10\text{Hz}$,选取隧道爆破安全允许质点振动速度为 $5\sim 9\text{cm/s}$,当主振频率为 $10\sim 50\text{Hz}$ 时,选取隧道爆破安全允许质点振动速度为 $8\sim 12\text{cm/s}$,当主振频率 $> 50\text{Hz}$ 时,选取隧道爆破安全允许质点振动速度为 $10\sim 15\text{cm/s}$ 。

根据隧道与坡体的位置关系,在坡体附近与既有省道连接良好的位置处布设爆破振动监测点,并对监测点进行必要的保护。另外,测点应具有足够的强度和刚度,确保当爆破地震波通过该点时不发生明显的衰减。隧道爆破振动监测系统主要由拾震器、信号转换器、数据采集系统组成。拾震器需安装在较平整的混凝土表面,使用黏性较好的材料将拾震器与混凝土黏结密实。

首先采集并提取计算机记录的爆破地震波监测数据,然后识别不同频率段的爆破地震波振幅最大值,最后分析隧道爆破振幅是否在允许范围内。当发现爆破振幅将要超过或已超过相关的控制标准时,应及时优化隧道每循环开挖进尺,并对装药量、装药结构等爆破参数进行适当调整。

隧道左洞ZK80+092—ZK80+094段洞顶距省道仅为2m,此段采用上台阶悬臂铣挖机掏槽预留核心土+周边眼爆破的方式施工。爆破振动监测数据显示,该段隧道爆破振动信号频率主要为 $10\sim 50\text{Hz}$,爆破最大振动速度峰值约为 3.13cm/s ,远小于爆破安全允许质点振动速度,满足规范要求。为安全起见,后续施工过程中仍采用短进尺的方式,控制每循环开挖进尺 $\leq 2\text{m}$,且不加大爆破量,每循环周边眼装药量控制在8.0kg左右。

2.4 洞内支护加强措施

根据隧道进口段泥质软弱围岩特点,在受施工扰动的情况下易引发洞内拱顶塌方、大变形等问题。为有效配合机械开挖,需采取相关措施,严格控制洞内变形。

超前大管棚具有较强的超前支撑能力和控制沉降能力^[12],通过与型钢拱架、末端基岩连接,形成可靠的支护体系,对洞内变形的控制效果较明显。隧道左、右线进洞前,在暗洞桩号位置施工套拱超前支护,套拱超前大管棚长36m;进入暗洞后,洞内采用9m长超前短管棚进行支护,套拱管棚与洞内超前短管棚搭接长度 $\geq 10\text{m}$ 。

控制隧道洞内变形的关键还在于两侧拱脚位置的锁脚支护。选用控制沉降能力较强的锁脚钢管桩进行支护,即在起拱线、边墙拱脚位置左、右侧各打设2根 $\phi 89\text{mm}\times 6\text{mm}$ 注浆钢管,纵向间距与钢架间距相同,外插角为 $45^\circ\sim 60^\circ$,长9m(可根据实际情况进行调整),确保钢管桩嵌入中风化岩层的厚度 $\geq 50\text{cm}$,钢管桩与型钢拱架焊接。洞内加强超前支护与锁脚支护立面如图4所示。

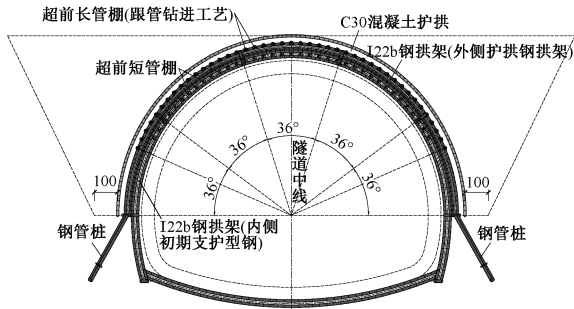


图4 洞内加强超前支护与锁脚支护立面

3 结语

本文以西南地区南丹至天峨下老高速公路向阳2号隧道下穿既有省道工程为例,对不稳定坡体微扰动施工技术与参数进行分析,并结合现场爆破振动监测数据,分析微扰动施工技术的合理性。

1)隧道下穿既有省道不稳定坡体时,采用抗滑桩与锚索防护+拱盖法进洞+机械开挖与控制爆破+洞内支护加强措施的微扰动施工技术后,既有省道交通未出现中断,洞顶坡体未发生滑移,表明微扰动技术施工效果较好。

2)隧道洞口仰坡坡体整体稳定性较差,边坡易发生折线型滑动破坏或局部滑塌,进洞前首先应施工可靠的坡体预加固支护措施(抗滑桩+预应力锚索),有效应对后续施工突发状况,切实保证坡体安

全、稳定。

3)针对隧道洞口处于偏压斜交地形的特点,为减小偏压地形对隧道洞口的影响,基于设计标准化、现场施工方便、易于推广等,提出拱盖法进洞工法,以充分适应地形,在最大限度上避免扰动坡体。

4)针对隧道围岩特点、断面尺寸和周边环境等,采用机械开挖与控制爆破技术,并在隧道爆破过程中进行爆破振动实时监测,以便及时调整施工参数,达到良好施工效果。

参考文献:

- [1] 石杨钊,叶军永,朱云涛.浅埋公路隧道下穿既有铁路线路基施工技术及管理措施[J].施工技术,2015,44(S1):174-176.
- [2] 周文.下穿既有运营公路大断面浅埋隧道方案优选及监测分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(4):520-527.
- [3] 王伟兴,张忠华,周瑜,等.延崇高速公路杏林堡隧道下穿S241省道浅埋碎石土段施工技术[J].公路,2020,65(3):349-352.
- [4] 范昌杰.隧道下穿高速公路施工引起的道路变形分析[J].公路,2020,65(3):299-305.
- [5] 林利安,李晓博.复杂地质条件下隧道下穿既有公路施工与监测[J].广东公路交通,2016,42(4):101-104.
- [6] 邓启华.宝峰隧道富水粉细砂段下穿高速公路综合施工技术[J].施工技术,2019,48(19):73-78.
- [7] 张耀双.浅埋隧道下穿既有道路的施工技术研究[J].城市住宅,2019,26(5):181-182.
- [8] 侯晓鹤,邹锋,刘开建,等.下穿既有高速公路施工方法研究[J].城市住宅,2020,27(12):234-236.
- [9] 李培锋,李斯涛,李春,等.潜在不稳定边坡复合式主动加固方法研究[J].施工技术,2021,50(4):95-98.
- [10] 漆泰岳,李斌.悬臂掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J].现代隧道技术,2011,48(4):32-38.
- [11] 项志敏,袁仁爱,罗田郎.浏阳河隧道悬臂掘进机铣挖工艺研究[J].铁道标准设计,2008,52(4):81-83.
- [12] 张勇.铁路山区隧道软弱围岩全断面机械化开挖技术[J].施工技术,2021,50(9):113-116.