

隧道洞口段二衬病害评价分析及处治技术

张龙生¹, 翁贤杰¹, 熊小华¹, 刘军²

1. 江西交通咨询有限公司, 江西 南昌 330008; 2. 江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330008

摘要:为治理隧道洞口段二衬病害,以某隧道进洞口段二衬开裂病害实例,从二衬裂缝分布、衬砌厚度、钢筋间距、仰拱回填等方面分析衬砌病害特征,采用荷载结构法通过数值计算获得典型病害断面的弯矩、轴力、剪力和安全系数,评估隧道结构安全状态。研究表明: S_0 型和 S_5 型衬砌最小安全系数均低于规范要求,运营安全风险较高。针对二衬病害提出了围岩注浆加固、二衬粘贴钢板加固、明洞段拆除重建、过程动态监测为核心的系统处治技术。在隧道洞口段二衬病害处治过程中,累计拱顶沉降、收敛、裂缝发展和边坡位移分别为3.99、2.73、0.82、8.17 mm,变形速率分别为0.069、0.048、0.014、0.143 mm/d,均小于规范规定的监测项目控制标准,证明隧道洞口段二衬病害系统处治系统技术有效,可为类似病害处治提供参考。

关键词:二衬病害;隧道洞口段;荷载结构法;数值分析;处治技术

中图分类号:U457+.2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0072-09

引用格式:张龙生,翁贤杰,熊小华,等.隧道洞口段二衬病害评价分析及处治技术[J].山东交通学院学报,2022,30(2):72-80.

ZHANG Longsheng, WENG Xianjie, XIONG Xiaohua, et al. Analysis and treatment technology of the secondary lining diseases in the tunnel entrance[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2): 72-80.

0 引言

近年来,我国公路隧道修建数量增长迅速,受地质条件、设计理念、施工质量和运营环境等多因素影响,隧道运营使用期间二次衬砌裂缝病害较为突出^[1-4],严重影响隧道运营安全。目前国内外学者对运营隧道二衬开裂问题进行研究:薛晓辉等^[5]对北茹隧道裂缝进行调查分析,基于可拓学理论评价有裂缝衬砌结构的可靠性;张素磊等^[6]结合隧道二衬开裂实例,对裂缝进行长期监测,将裂缝分为周期性变化型、增长型、平稳型和闭合型4类,并提出了相应的防治措施;杨明举等^[7]、徐林生^[8]通过分析地质条件和二衬裂缝情况,提出了采用裂缝填塞、粘贴环向钢板等处治措施;李宇杰等^[9]采用数值分析方法,研究了纤维布补强对衬砌裂缝的加固效果;裴涛涛等^[10]将衬砌裂缝分为无水型和渗漏型,并根据裂缝不同类型提出了喷锚支护、套拱或换拱和注浆回填堵漏等整治措施;吕军等^[11]分析了既有隧道的裂损和水害情况,对隧道结构进行稳定性分析,综合考虑裂缝宽度和水害类型,提出了凿槽嵌缝、锚杆补强等处理措施。

隧道洞口地段埋深浅、地质条件复杂,洞口段二衬病害治理安全风险高。目前关于隧道洞口段病害的治理研究缺乏一定的系统性和可靠性。本文结合某隧道进洞口段二衬开裂病害实例,从二衬裂缝分布、衬砌厚度、钢筋间距、仰拱回填情况等方面分析衬砌病害特征,采用荷载结构法计算典型病害断面弯矩、轴力、剪力和安全系数,评估隧道结构安全状态,针对明洞病害段提出了二衬粘贴钢板加固、拆除重建、以隧道变形动态监测为核心的系统处治技术,以期类似病害处治提供参考。

收稿日期:2021-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51909147,51909270);江西省科技厅科技项目(2020C0005)

第一作者简介:张龙生(1966—),男,南昌人,教授级高级工程师,主要研究方向为公路工程建设管理及施工技术,E-mail:1092858039@qq.com。

1 工程概况

某隧道是一座分离式四车道高速公路短隧道,左幅起讫桩号为 ZK16+650—995,长 345 m,右幅起讫桩号为 YK16+649.7—994.7,长 345 m。左右幅净距平均 9.6 m,为小净距隧道。隧道洞体最大埋深 110 m,山体表面植被发育,微地貌以丘陵夹冲沟为特征,隧道区域地形起伏,切割强烈,常见 V 形沟谷。进洞口邻近沟谷部位,存在地形偏压。隧道沿线出露基岩地层为强风化和中风化震旦系砂岩等,覆土层为第四系碎石土。隧址区地质构造复杂,褶皱断裂都较为发育。

此隧道于 2012 年 12 月建成通车,在 2019 年 9 月养护检查时发现隧道进口右洞端墙开裂,洞口段 40.3 m(明洞 25.0 m,暗洞 15.3 m)范围二衬出现裂缝、施工缝错台开裂病害。连续监测显示,部分裂缝有继续发展的趋势,存在较大安全隐患。

2 衬砌结构病害分析

2.1 衬砌裂缝

采用裂缝计、RSM-SY5 声波检测仪、地质罗盘仪等测量衬砌裂缝宽度、长度、深度及裂缝方位角度等参数,获取裂缝展布规律。至 2020 年 1 月,YK16+652—673 段左拱腰原有 3 条纵向裂缝长度发展至 11.7 m,最大宽度为 5.8 mm,最大深度为 281.5 mm;YK16+681—687 段拱顶原有纵向裂缝的长度扩展至 6.7 m,最大宽度为 3.7 mm,最大深度为 216.3 mm。新发现 6 条较明显裂缝,其中 3 条环向、2 条斜向、1 条纵向,新增裂缝最长达 8.9 m,部分环向裂缝已呈连通趋势。此外,二衬表面还存在渗水、细小裂纹、偏压墙及路面开裂等病害。二衬主要裂缝分布特征如表 1 所示。

表 1 二衬主要裂缝分布特征

桩号	位置	长度/m	宽度/mm	深度/mm	裂缝形态
YK16+666	右边墙	2.5	1.9~5.7	176.3~194.9	环向
YK16+652—673(原有裂缝)	左拱腰	11.7	4.6~5.8	153.2~281.5	纵向
YK16+668—674	拱顶	6.8	2.8~4.6	257.4~262.1	纵向
YK16+675	右边墙	3.6	1.7~4.9	189.1~235.6	斜向
YK16+669—675(原有裂缝)	右拱腰	6.2	3.9~5.5	176.2~208.7	纵向
YK16+681—687(原有裂缝)	拱顶	6.7	1.8~3.7	193.2~216.3	纵向
YK16+677—683	左拱腰	8.9	1.3~2.3	188.5~212.1	斜向
YK16+685—690	右边墙	7.3	1.6~3.4	192.8~223.2	环向
YK16+684	左边墙	4.0	2.1~2.6	169.8~209.8	环向

病害衬砌裂缝多种裂缝形式均有发育,包括环向裂缝、纵向裂缝、斜向裂缝,裂缝宽度大多不超过 6.0 mm,裂缝深度大多在 150~280 mm,长度大多不超过 12.0 m。

2.2 二衬施工质量检测

2.2.1 衬砌厚度

采用 400 MHz 地质雷达检测隧道 YK16+649.7—690 段二衬边墙、拱腰和拱顶的厚度,检测结果如图 1 所示。

由图 1 可知:YK16+650—674.7 段衬砌支护形式为 S_0 型(明洞),二衬设计厚度为 60 cm;实际测量 YK16+662—674.7 段二衬拱腰、拱顶厚度不足,最薄处厚度仅 23.0 cm。YK16+674.7—690 段衬砌支护形式为 S_5 型(V 级围岩),二衬设计厚度 50.0 cm;存在局部厚度不足,实测拱顶厚度最小为 43.0 cm。

2.2.2 钢筋

隧道 YK16+650—690 段二衬钢筋数量及间距检测结果如表 2 所示。

由表 2 可知:此隧道二衬钢筋间距未达到设计要求, YK16+650—673 段未配钢筋,暗洞段配筋约为设计配筋的 58.0%~74.3%。

对明洞偏压墙钢筋分布情况进行检测,检测结果发现 YK16+650—665 段偏压墙无钢筋,与设计要求不符。

2.3 仰拱钻孔取芯

为查明隧道仰拱及基底施工情况,对病害段进行路面取芯检测。每隔 10 m 设置 1 个断面,各断面在行车道中心线附近和近排水沟 1 m 处布置 2 个取芯孔。钻孔 0~1.1 m 内取芯可见较完整混凝土,1.1 m 以下为破碎混凝土及中-强风化状砂岩;钻孔未揭露到钢筋,基底较软弱,地下水较丰富,仰拱及回填未达到设计要求。

3 隧道结构安全状态计算评估

基于病害检查及二衬检测结果,建立病害段隧道结构计算模型,分析病害对隧道衬砌结构承载力的影响,评价目前隧道衬砌结构的安全性。

3.1 计算方法

采用荷载结构法分析隧道衬砌结构承载力比较直观简便,应用较广泛^[12]。建立隧道病害结构计算模型时,采用梁单元,重点考虑存在的病害对梁单元模拟衬砌结构承载轴向荷载、剪切荷载与弯曲荷载能力的影响。根据文献[13]规范,采用荷载结构法计算复合式衬砌结构时,对 V 级围岩设计二衬承担 70% 隧道所承受荷载;对 IV 级围岩设计二衬承担 30% 隧道所承受荷载。

3.2 断面选取

根据二衬厚度、背后脱空和配筋实际检测情况,选取 S_0 型和 S_5 型 2 种衬砌中质量缺陷最严重的断面进行结构验算。

YK16+650—673 段 S_0 型二衬未配钢筋。其中, YK16+654 断面病害最为严重,二衬平均厚度最小(仅 37.1 cm),且存在纵向裂缝,深 198.6 mm,宽 5.2 mm,故选为 S_0 型衬砌验算断面。隧道衬砌左侧受偏压作用,左侧边坡坡度为 $40^\circ \sim 45^\circ$, S_0 型衬砌荷载结构计算模型如图 2a) 所示。

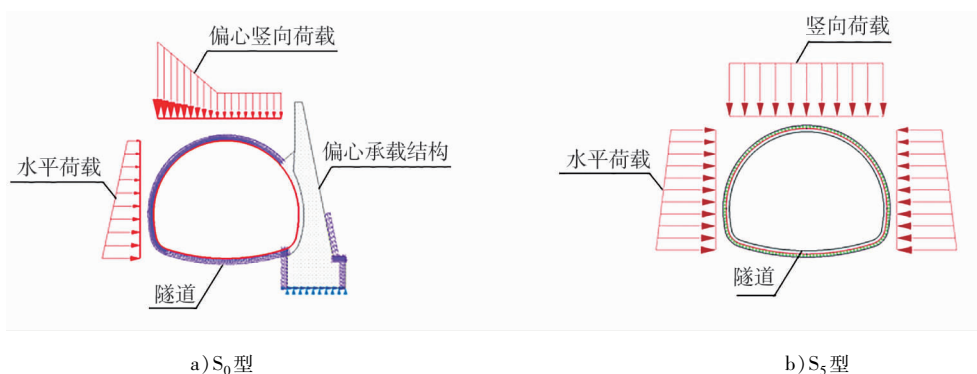


图 2 衬砌计算结构模型

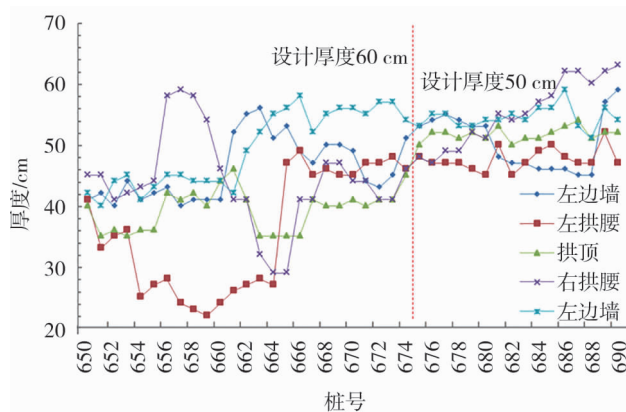


图 1 二衬各部位厚度检测结果

表 2 二衬钢筋数量及间距检测结果

桩号	实测二衬钢筋		设计二衬钢筋	
	数量	间距/cm	数量	间距/cm
YK16+650—660	0	0	50	20
YK16+660—673	0	0	65	20
YK16+673—680	26	26.9	35	20
YK16+680—690	29	34.5	50	20

YK16+680—690段S₅型二衬钢筋缺少数量最为严重,钢筋实际间距为设计间距的1.73倍。其中,YK16+682断面平均厚度最小,为50.2cm,存在纵向及斜向裂缝,裂缝深276.8mm,宽3.1mm,故选为S₅型衬砌验算断面。计算模型如图2b)所示。

3.3 材料计算参数

计算时二衬配筋情况参照实际检测结果,未配筋的断面按素混凝土结构进行计算,二衬厚度取实测平均厚度,裂缝位置的衬砌厚度按实际有效厚度与设计厚度比折减。所选断面的二衬及围岩材料参数如表3所示。

表3 所选断面二衬及围岩计算参数

材料类型	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	地层弹簧模量/(MPa·m ⁻¹)	计算内摩擦角/(°)	坚固系数
S ₀ 型二衬	2550	20.0	150		
S ₅ 型二衬	2550	29.5	200		
回填黏土	1840	15.0			
V级围岩	1940			45	4

根据永久荷载-基本可变荷载计算原则确定混凝土安全系数。依据文献[13]要求,对于达到抗压极限强度的混凝土结构,二衬结构安全系数为2.4;对于达到抗拉极限强度的混凝土,二衬结构安全系数为3.6。

3.4 计算结果分析

S₀型和S₅型衬砌荷载结构弯矩、轴力、剪力和安全系数情况如图3、4所示。

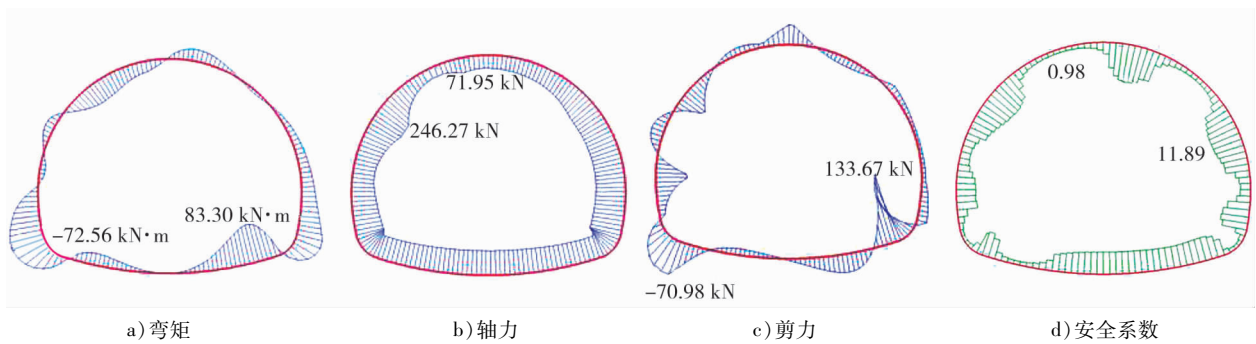


图3 S₀型衬砌弯矩、轴力、剪力和安全系数计算结果

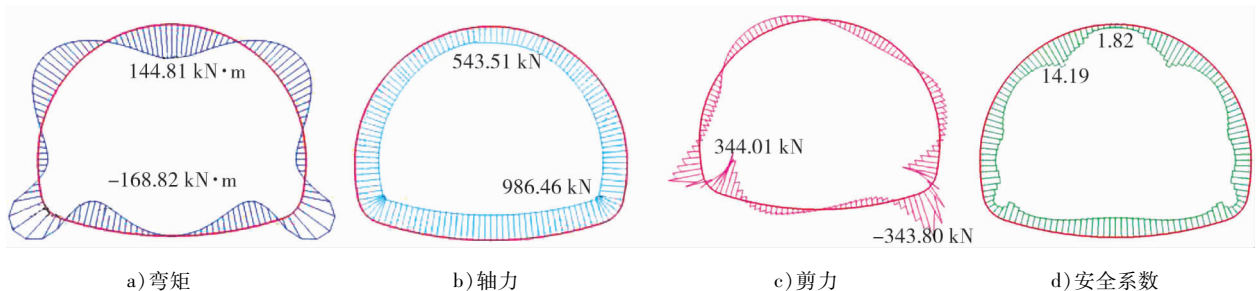


图4 S₅型衬砌弯矩、轴力、剪力和安全系数计算结果

由图3可知:受偏压、裂缝、二衬厚度不足和未配钢筋质量缺陷的影响,YK16+654断面左拱腰附近最小安全系数仅为0.98,远低于文献[13]要求的3.60,隧道承载力较小,运营安全风险极高。

由图4可知:因断面存在裂缝,且实际钢筋数量少于设计要求,钢筋间距大于设计配置,YK16+682断面安全系数为1.82,低于文献[13]要求的2.40,有一定的安全隐患。现场病害调查中发现,此断面附近

表观病害暂无明显地发展趋势。

4 衬砌病害处治关键技术

4.1 总体方案

根据第3章计算结果, YK16+650—674.7明洞段衬砌安全系数较低, 承载力极低, 为防止隧道结构突然破坏坍塌, 保证行车安全, 应及时关闭隧道, 对明洞段二衬拆除重建, 彻底根治病害。

YK16+674.7—690暗洞段隧道结构暂时处于稳定状态。为保证隧道营运安全, 对该段围岩采用管棚注浆加固, 二衬采用粘贴钢板加固, 提高围岩的自稳性和二衬的承载及抗裂能力。

拆除明洞段二衬时, 洞口段围岩将受到一定扰动。处治衬砌病害应先粘贴钢板加固暗洞段, 再进行明洞段的拆除重建。病害处治过程中, 采用全过程监测手段, 保障施工安全。

4.2 暗洞段围岩和二衬加固

4.2.1 围岩管棚注浆加固

在原套拱上方施作新套拱, 用于定位并支撑管棚末端。套拱纵向长2 m, 采用3榀I16工字钢, 环向主筋采用直径22 mm的HRB400钢筋, 底部采用扩大拱脚, 套拱基础采用厚20 cm的C20混凝土换填加强处理。管棚采用108 mm × 6 mm, 环向间距为50 cm, 拱部150°范围布置, 每环33根; 为保证管棚前端可靠支撑于合格二衬段, 管棚设计单根长25 m, 仰角角度为10°~15°。管棚注浆压力为0.5~1.0 MPa, 以低压渗透注浆为主加固围岩, 防止高压造成浆液堵塞隧道排水系统。管棚注浆完成后, 内插3根 $\Phi 18$ mm的HRB400钢筋, 并注入水灰质量比为1:1的水泥砂浆, 耐久性好的的支护结构。暗洞段围岩管棚注浆加固如图5所示。

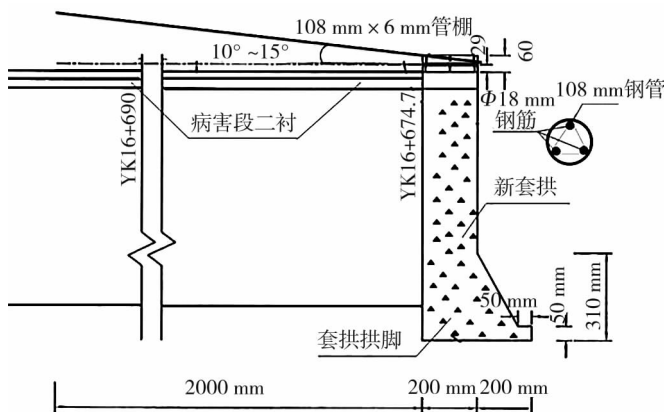


图5 围岩管棚注浆加固示意图

4.2.2 二衬粘贴钢板加固

对YK16+674.7—690段拱脚以上范围进行二衬全断面粘贴钢板加固。钢板环向长19.68 m, 厚7 mm, 纵距为1 m, 幅宽250 mm, 采用Q345钢板。钢板加固时采用M12化学锚栓, 锚栓沿钢板中线梅花形布设, 环向距离为40 cm。注胶孔位于化学锚栓两侧, $\Phi 10$ mm, 间距为20 cm, 注胶孔压入A级粘钢胶。钢板加固如图6所示。

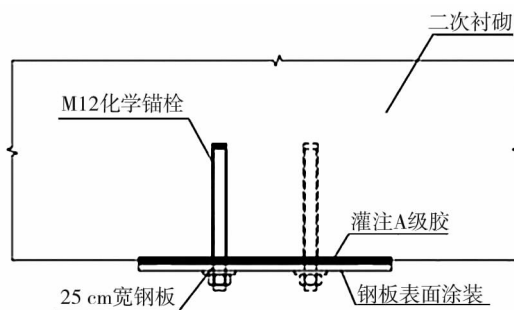


图6 粘贴钢板加固示意图

4.3 明洞段二衬拆除重建

暗洞段二衬粘贴钢板施工完成, 静置养护, 粘钢胶凝固达到强度后拆除明洞段二衬重建。为保证拆除施工安全, 按照洞口边仰坡预加固、临时支撑锁口、衬砌逐段拆除和重建衬砌的顺序施工。

4.3.1 边仰坡预加固

病害处治期间正值雨季, 边坡受雨水冲刷、渗透、浸泡作用, 有滑坡、坍塌风险。为防止拆除过程中边仰坡失稳, 先对边仰坡进行预加固处理。洞顶回填土以上边坡8 m范围采用 $\Phi 42$ mm注浆小管加固, 注浆管长8 m, 间距为2 m × 2 m, 呈梅花形布置。明洞范围边仰坡、中间岩柱加固与回填土清除同时进行, 清

除一段加固一段;加固均采用 $\Phi 25$ mm 中空注浆锚杆,锚杆长 4.5 m,纵向间距为 0.5 m,坡面间距为 1 m,坡面挂 $\Phi 6$ mm 钢筋网,喷射厚 6 cm 的 C20 混凝土。边仰坡预加固设计如图 7 所示。

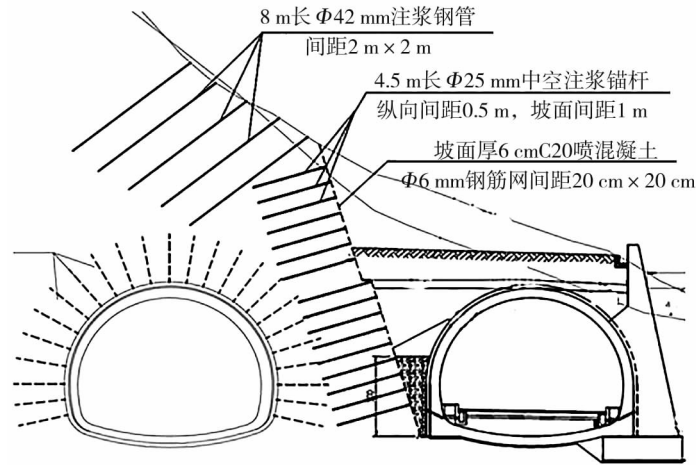


图7 边仰坡预加固示意图

4.3.2 临时支撑锁口

二衬拆除风险较大,不可控因素多,为防止拆除引起相邻二衬的连锁破坏,在二衬拆除前,对相邻未拆除衬砌进行锁口。锁口采用 I20b 钢拱架临时支撑,间距为 0.5 m,每次锁口长 5 m,循环利用。钢拱架间采用 $\Phi 22$ mm 钢筋进行纵向连接,形成整体。临时支撑锁口如图 8 所示。

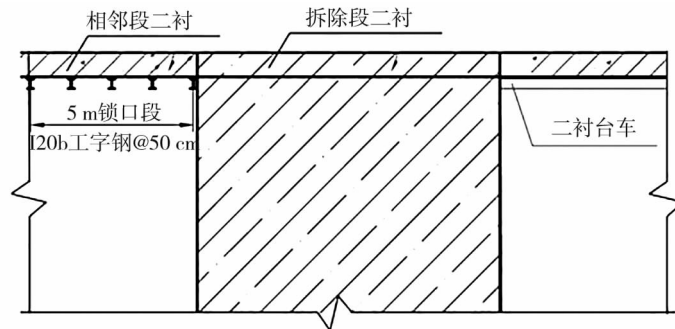


图8 临时支撑锁口示意图

4.3.3 逐段拆除重建

待二衬台车拼装到位、相邻段临时支撑锁口完成和雨水临时截流等工序施作完毕后拆除二衬。拆除二衬从明暗交接处往洞门端墙方向进行,每次拆除按 1 个循环纵长 1.5 m 向前推进,严格控制 1 次拆除长度。当累计拆除长度为 6 m 时(另留 1 m 二衬端头封模操作空间),立即进行钢筋绑扎,及时浇筑二衬混凝土。

爆破振动对右洞衬砌影响较大,因此采用挖掘机装配破碎钻头施工,局部采用风镐清理,环向拆除。拆除时,先将起拱线以上洞顶拆除,再将两侧路面以上二衬拆除。施工中,作业机械在已重新施作二衬的遮护下进行逐步推进。洞内不得站人,配合人员必须保持 30 m 以上的安全距离。

4.4 全过程监测

布设监测点,对拆除过程中的山体边坡地表沉降位移、病害段二衬的沉降和收敛、裂缝进行全过程监测,实时监测结构变形相关信息,规避结构风险。

因全过程监测周期长,监测项目多、测点多、测期频和数据量大,采用自动化监测技术,对监测数据进行科学管理及快速分析处理,及时预判预警。

4.4.1 监测方法及测点布置

采用静力水准仪自动监测隧道拱顶沉降,设备量程为 200 mm,精度为 0.01 mm;采用数字摄像机和标识牌自动监测断面收敛,设备量程为 60 m,分辨率为 500 万像素。在隧道右进洞 50 m 内,每隔 10 m 设置 1 个监测断面,每个断面在拱顶、拱腰和边墙布设 5 个沉降、收敛监测点。

采用裂缝计自动监测隧道裂缝,采集数据监测裂缝发展情况。安装裂缝计时,在待测裂缝一侧衬砌上装载支架,另一侧垂直于衬砌表面安装裂缝计,裂缝计一侧固定在衬砌结构上,另一侧固定在支架悬臂上。洞口边仰坡观测点距地表约 1 m,纵向间距为 6 m,测点采用钢筋置于基岩或原状土层中,四周用混凝土护住;采用全站仪量测空间变形数据,读取三维空间的位移数据。各项监测频率均为 1 次/(4 h),监测周期为整个修复过程。

4.4.2 监测控制标准

根据文献[13-16]设计要求及类似工程的施工经验,确定本工程隧道警戒累计位移、警戒变化速率、控制累计位移、控制变化速率,如表 4 所示。

表 4 隧道各监测参数的规范要求

监测项目	警戒累计位移/mm	警戒变化速率/(mm·d ⁻¹)	控制累计位移/mm	控制变化速率/(mm·d ⁻¹)
二衬拱顶沉降	±16.00	±1.60	±20.00	±2.00
二衬水平收敛	±8.00	±0.80	±10.00	±1.00
二衬裂缝发展	±1.60	±0.16	±2.00	±0.20
边坡地表位移	±16.00	±1.60	±20.00	±2.00

注:沉降、收敛为正,隆起、外扩为负。

4.4.3 监测结果分析

以 YK16+660 监测断面为例,2020-04-16—07-30 二衬的拱顶沉降、水平收敛、裂缝和附近边仰坡位移随时间变化情况如图 9 所示。

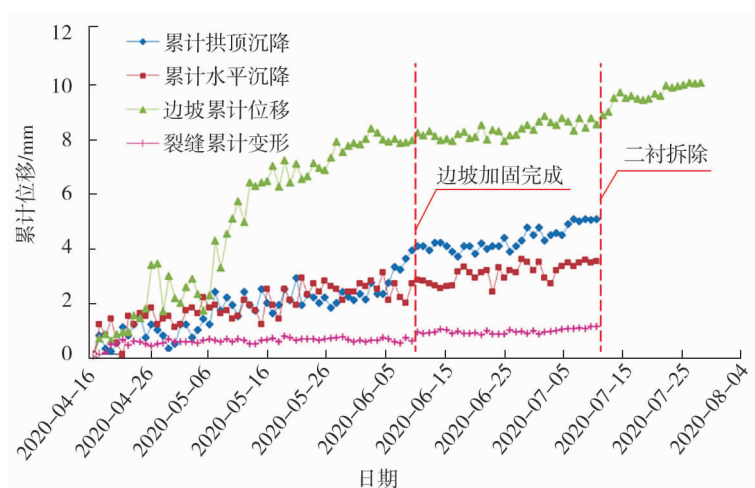


图 9 YK16+660 断面监测变化曲线

由图 9 可知:6 月 11 日边坡加固完成前,受雨季降雨等因素影响,二衬的拱顶沉降、水平收敛、地表边坡位移和裂缝增长较快;随着边坡加固的进行,各监测项目增长缓慢;期间累计拱顶沉降、收敛、裂缝发展和边坡位移分别为 3.99、2.73、0.82、8.17 mm,变形速率分别为 0.069、0.048、0.014、0.143 mm/d;累计值和变化速率均小于监测项目的控制标准。边坡加固完成后,二衬的累计拱顶沉降、收敛、边坡位移和发展趋势裂缝发展增长较平缓,变形速率分别为 0.032、0.022、0.007、0.009 mm/d。7 月 13 日拆除二衬后,边坡位移短时有增大趋势,至 7 月 22 日二衬重建完成后,边仰坡位移基本趋于稳定。

因此,采用边坡预先加固、临时支撑锁口和逐段拆除二衬处治方法,能有效约束二衬结构病害的发展,使二衬拆除过程处于安全可控状态。

5 结论

1) 病害处治应遵循探查先行原则,综合采用裂缝检测仪、地质雷达、钻孔取芯等探查手段,获取隧道二衬裂缝分布规律和结构病害情况,为后续治理提供依据。

2) 基于病害检查及二衬检测结果,以最不利原则(验算质量缺陷最严重断面),建立病害段隧道结构的计算模型,采用荷载结构法计算分析隧道衬砌结构的安全性能状况。经计算, S_0 型衬砌最小安全系数仅为0.98,安全储备远低于文献[13]要求的3.60,隧道运营安全风险极高; S_5 型衬砌安全系数为1.82,低于文献[13]要求的2.40,有一定的安全隐患。

3) 根据病害段隧道结构安全状态的计算结果,对未配置钢筋的明洞段二衬拆除重建,彻底根治病害,并遵循洞口边仰坡预加固、临时支撑锁口、衬砌逐段拆除和重建衬砌的施工顺序,保障安全;对于衬砌安全系数低于文献[13]要求的暗洞段二衬,裂缝未现明显发展趋势,采用围岩管棚注浆和二衬粘贴钢板加固的双重加固机制,提高围岩的自稳性和二衬的承载及抗裂能力。

4) 病害处治过程中,对山体边坡累计位移、病害段二衬的沉降和收敛、裂缝等进行全过程实时监测,保障施工安全。监测结果显示,累计拱顶沉降、收敛、裂缝发展和边坡位移分别为3.99、2.73、0.82、8.17 mm,变形速率分别为0.069、0.048、0.014、0.143 mm/d,累计变形和变化速率均小于控制标准,证明二衬病害系统处治技术的有效性,可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 蒋树屏,林志,王少飞. 2018年中国公路隧道发展[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1217-1220.
- [2] 黄新社. 隧道衬砌裂缝及渗漏水治理技术[J]. 隧道建设, 2006, 26(3): 32-35.
HUANG Xinshe. Technology for treatment of tunnel lining cracks and seepage water[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(3): 32-35.
- [3] 罗鑫,夏才初. 隧道病害分级的现状及问题[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 877-880.
LUO Xin, XIA Caichu. Current situation and problems of classification of tunnel diseases[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 877-880.
- [4] 邹育麟,何川,周艺,等. 重庆高速公路现役营运隧道渗漏水病害统计及成因分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(1): 86-93.
ZOU Yulin, HE Chuan, ZHOU Yi, et al. Statistics and cause analysis of leakage diseases in operating expressway tunnels in Chongqing[J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 30(1): 86-93.
- [5] 薛晓辉,张军,宋飞. 基于可拓学理论的带裂缝隧道衬砌可靠性评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 374-379.
XUE Xiaohui, ZHANG Jun, SONG Fei. Reliability evaluation of tunnel lining with cracks based on extension theory[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016, 39(3): 374-379.
- [6] 张素磊,张顶立,刘昌. 公路运营隧道衬砌裂缝长期监测及分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 17-25.
ZHANG Sulei, ZHANG Dingli, LIU Chang. Long-term monitoring and analysis of lining cracks in operating highway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 17-25.
- [7] 杨明举,黄景林. 隧道衬砌开裂探析及处治措施[J]. 公路, 2014, 59(8): 304-307.
- [8] 徐林生. 隧道工程衬砌结构补强加固技术研究[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 203-206.
- [9] 李宇杰,王梦恕,徐会杰,等. 纤维布补强地铁隧道结构的数值分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 138-144.
LI Yujie, WANG Mengshu, XU Huijie, et al. Numerical analysis of metro tunnel structure reinforced with fiber cloth material [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 138-144.
- [10] 裴涛涛,陈礼伟,史宪明,等. 既有铁路隧道衬砌裂损整治措施研究[J]. 铁道建筑, 2013(4): 76-79.

- PEI Taotao, CHEN Liwei, SHI Xianming, et al. Study on treatment measures of cracks in lining of existing railway tunnel [J]. *Railway Engineering*, 2013(4):76-79.
- [11] 吕军, 李凤翔, 聂子云. 既有公路病害隧道稳定性分析及整治技术[J]. *公路工程*, 2011, 36(6):107-111.
LÜ Jun, LI Fengxiang, NIE Ziyun. Stability analysis and treatment measures of the existing and diseased road tunnel[J]. *Highway Engineering*, 2011, 36(6):107-111.
- [12] 丁文其, 郑康成, 金威. 某深埋分岔隧道空间荷载结构计算方法[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(2):90-97.
DING Wenqi, ZHENG Kangcheng, JIN Wei. Spatial load-structure calculation method for a deep forked tunnel[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(2):90-97.
- [13] 公路隧道设计规范:第一册 土建工程 JTG 3370.1—2018 [S]. 北京:人民交通出版社,2019.
- [14] 刘学增, 蔡鑫, 丁茂瑞, 等. 破碎围岩大跨公路隧道结构健康度评价方法研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(1):26-35.
LIU Xuezheng, CAI Xin, DING Maorui, et al. Study on health evaluation method of large-span highway tunnel with fractured surrounding rocks[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(1):26-35.
- [15] 孙洋. 大断裂带片岩区公路隧道二衬开裂机理及安全评价[D]. 武汉:中国地质大学, 2015.
SUN Yang. The secondary lining cracking mechanism and safety assessment of highway tunnel in schist area with large faults [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [16] 徐国文, 何川, 汪耀, 等. 流变荷载作用下隧道裂损二次衬砌结构安全性能研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(12):114-123.
XU Guowen, HE Chuan, WANG Yao, et al. Study on the safety performance of cracked secondary lining under action of rheological load[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(12):114-123.

Analysis and treatment technology of the secondary lining diseases in the tunnel entrance

ZHANG Longsheng¹, WENG Xianjie¹, XIONG Xiaohua¹, LIU Jun²

1. Jiangxi Transport Consultation Company, Nanchang 330008, China;

2. Jiangxi Provincial Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China

Abstract: To solve the diseases of secondary lining, combined with an practical cracking diseases of secondary lining at the tunnel entrance, the characteristics of the lining diseases are explored from the distribution of the cracks in the secondary lining, the thickness of the lining, the spacing of steel bars, and invert backfill, etc. The load structure method is used to obtain the bending moment, axial force, shear force and safety factor of the typical diseased section through numerical calculation, and the safety state of the tunnel structure is evaluated. The results show that the minimum safety factors of S_0 and S_5 linings are lower than the standard requirements, and the operational safety risks are high. Aiming at the secondary lining diseases, the systematic treatment technology with grouting reinforcement of surrounding rock, bonding steel plate reinforcement of secondary lining, demolition and reconstruction of open hole section and dynamic monitoring of process are put forward. In the treatment process of secondary lining diseases in tunnel portal section, the cumulative vault settlement, convergence, crack development and slope displacement are 3.99, 2.73, 0.82 and 8.17 mm, respectively, and the deformation rates are 0.069, 0.048, 0.014 and 0.143 mm/d, which are all less than the monitoring project control standards that proves the effectiveness of the secondary lining disease treatment system technology in tunnel portal section, and can provide reference for the treatment of similar diseases.

Keywords: secondary lining disease; tunnel entrance section; load structure method; numerical analysis; treatment technology

(责任编辑:郭守真)