

# 公路隧道路面变形病害原因与维修加固措施分析

钟权武

云南交通基建工程监理有限公司 云南昆明 650021

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19770

**[摘要]** 现如今我国山区公路网络日趋完善,公路隧道已经成为高原山地交通路网中重要的组成部分,而云南地区地质条件较为复杂,断裂带、岩溶富水地层分布普遍,故大量运营期公路隧道在长期重载交通、水文地质侵蚀、材料劣化诸因素共同作用下出现路面隆起、沉降、开裂、错台等变形病害,直接危及隧道行车安全,也缩短了结构使用寿命。基于此,本文以云南 G553 蒙元线仙人洞隧道工程为依托,有层次地分析了公路隧道路面变形病害的主要类型及特征,从地质水文、设计施工、运营管理诸方面厘清病害根本成因,继而提出系列维修加固技术措施,最后结合工程实际明确监管管控要点。本文的研究对西南山区同类型公路隧道病害处治及养护维修有较好的借鉴意义。

**[关键词]** 公路隧道;路面变形;病害成因;维修加固;工程监理

由于云南省地处云贵高原,山高谷深,地质构造复杂,故公路隧道是云南省区域干线路网中十分重要而常见的组成部分。而隧道路面直接承受车辆荷载,又不可避免地受到围岩应力、渗漏水、温湿度变化诸种因素的共同作用,因此隧道路面是隧道结构中病害易发生且尤需关注的部位。位于云南省个旧市的 G553 蒙元线仙人洞隧道为单洞双向两车道隧道,全长 2364m,自 2002 年通车运营以来,因所处位置穿越破碎断裂带、地下水丰富,故隧道路面出现隆起、电缆沟外倾、基层开裂诸种典型变形病害。本文结合仙人洞隧道加固改造工程实践,厘清路面变形病害的发生机理,提出科学合理的维修加固措施及监管管控方法,切实为山区公路隧道长期安全运营提供有力支撑。

## 1. 公路隧道路面变形病害的主要类型与特征

### 1.1 路面隆起变形

路面隆起是山区富水隧道常见而典型的病害,即路面局部或连续段向上隆起,横、纵向裂缝发育,常与电缆沟外倾、检修道变形相伴出现。仙人洞隧道某段路面最大隆起量已达 12cm,电缆沟向行车道侧倾且开裂,因而直接侵入行车限界,车辆通行时易发生剐蹭、失控事故。这种病害多发生于围岩破碎、地下水丰富的地段,变形具有缓慢累积性,故若不能及时、合理地处治,路面结构终将整体失稳。

### 1.2 路面不均匀沉降

不均匀沉降典型表现是隧道纵向路面标高下降,局部凹陷,一般发生于洞口段、围岩级别突变段及软弱围岩段,其根本特征是沉降差很大,故易形成路面错台,影响行车舒适性,又使路面结构层处于弯拉应力状态而开裂,裂缝又成为

地下水渗入的通道,由此形成“沉降→开裂→渗水→进一步沉降”的恶性循环,导致路面横坡失效,雨天路面积水,抗滑性能大大下降。

### 1.3 路面结构性开裂与错台

结构性开裂是变形病害常见的伴生表现,可合理地划分为划分为纵向、横向、网状裂缝及界面错台四类:纵向裂缝沿轮迹带分布,系路面隆沉所致的拉应力造成的,还可能贯穿整个结构层。横向裂缝多见于施工缝、变形缝处,系围岩水平应力及结构收缩变形二者共同作用的结果。网状裂缝是路面结构整体破坏的直接标志,其出现时路面已有松散、坑槽,基层及仰拱填充层都已严重劣化,承载能力极大降低。错台一般发生在施工缝、沉降缝处,是相邻路面板块竖向高差的一种体现,最严重时可达 50mm 以上,其根本原因是结构不均匀沉降及仰拱受力不均,因此易造成行车跳车,亦使接缝处防水体系失效,渗漏水加速结构进一步变形。

## 2. 公路隧道路面变形病害的成因分析

### 2.1 地质水文条件是病害发生的内因

由于西南山区隧道大多穿过断裂带、风化花岗岩、岩溶地层等不良地质体,围岩自稳能力较差,故运营中持续的应力重分布会对仰拱结构产生明显的挤压作用,从而导致路面变形。而仙人洞隧道轴线与仙人洞断裂近似平行,围岩松散破碎,花岗岩高岭土风化严重,因此周围地质条件是仙人洞隧道路面隆起的直接根源。

地下水是诱发本隧道病害的要素:其一为地下水长期渗流侵蚀软化围岩,使围岩物理力学参数不断劣化,围岩因此发生持续塑性变形,进而对仰拱施加底鼓压力,其二为衬砌

渗漏水渗入基层及仰拱填充层,使填充材料软化、泥化,结构承载能力急剧下降,受车辆荷载作用影响便发生沉降、开裂。仙人洞隧道病害段落无例外地存在渗漏水问题,仰拱填充层实测含水率远高于设计限值,由此有力地印证了地下水的作用。此外,隧道高湿环境、腐蚀性物质及温度循环应力将进一步加速材料劣化与裂缝扩展。

## 2.2 设计施工缺陷是病害发生的诱因

早期隧道施工时受技术水平的限制,对复杂地质勘察不够充分,故围岩分级与实际地质情况偏差很大,因此仰拱结构强度、配筋量都不足,排水体系设计又不合理,不能及时、可靠地疏导地下水,于是形成种种隐患。仙人洞隧道病害段落原设计没有设置专项排水降压措施,仰拱填充用素混凝土,抗变形能力很差。

施工质量管控不到位就是导致这些问题的直接原因,具体可归纳为四点:第一是仰拱施工深度、厚度都不足,混凝土强度未达标,一些仰拱与填充层被一次浇筑,因而破坏结构受力体系。第二是仰拱回填不密实,有空洞、松散体,在车辆荷载作用下被压密后发生沉降。第三是路面结构层压实度不够,配合比不准确,早期强度不足故易开裂,第四是防排水体系施工有严重缺陷,防水板破损、排水盲管堵塞,渗漏水不能及时、可靠排出。

## 2.3 运营荷载与管理不善导致病害发展

由于重载交通、超载车辆的反复作用是路面变形持续发展的直接外因,故干线公路货车通行量的增长必然导致路面长期处于超负荷受力状态,因此结构层疲劳损伤加速发展,单洞双向隧道的往复荷载又加剧结构动应力循环,二者都促进病害发生。

由于养护管理不到位、处治不及时,故轻微病害极易迅速恶化,因此不少管养单位对路面早期轻微裂缝、小范围隆起重视不够,没有及时采取预防性养护措施,又忽视对排水系统的日常清理维护,盲管、边沟堵塞致使排水失效,地下水积聚直接加剧路面变形。

## 3. 公路隧道路面变形病害维修加固关键技术

### 3.1 地下水源头处治技术

治水是路面变形病害处治的首要环节,因此宜系统地构建“堵、排、降”相结合的地下水防控体系,从源头消除水害影响:第一是围岩降压排水,在电缆沟内侧壁以 $20^\circ$ 倾角钻设直径90mm、深度3m的降压孔,孔内插入土工布包裹的DN75双壁打孔波纹管,再用DN50软橡胶管连通侧排水沟,

纵向每隔10m设一处,渗水密集区适当加密,由此可靠地降低围岩水压力。第二是渗漏水引排封堵,对衬砌施工缝、变形缝严重渗漏水,沿缝凿槽埋设半剖 $\Phi 90$ HDPE管,以环氧树脂砂浆密封沟槽,将渗漏水有序引排,而对路面裂缝渗漏水直接采用水泥基渗透结晶型防水涂料予以封闭,阻断渗水通道。

### 3.2 基础结构注浆加固技术

针对仰拱回填不密实、围岩破碎、基层软化引起的变形,合理地采用钢花管注浆加固技术对仰拱、基层及围岩予以整体加固:先用地质雷达对病害分布做精确探测,再以水泥净浆先行回填,继而用1:1水泥砂浆加固堵水,注浆管选用 $\Phi 76 \times 4$ mm钢花管,其端部伸入完整基岩不小于1.0m,横向、纵向均1.0m、1.2m间距梅花形布置,注浆压力宜控制在 $0.5 \sim 1.0$ MPa范围内。更重要的是注浆时严格按“由外向内、间隔跳孔、分级注浆”的原则操作,最后用地质雷达及钻芯取样对密实度进行检测,凡未达标处及时补注浆。

### 3.3 结构补强与路面修复技术

对路面变形严重、仰拱损坏地段,在注浆加固的基础上有层次地进行结构整体补强,具体方法可归纳为三部分:第一是内衬拱补强,即凿除原衬砌表层劣化混凝土,绑扎环向C22、纵向C16单层钢筋,用全断面模板台车浇筑25cm厚C35P8防水钢筋混凝土内衬拱,拱脚落在原仰拱面上,由此形成可靠的封闭受力体系,隧道整体抗变形能力因此大大提高。第二是路面修复,先凿除破损路面结构,对基层予以加固后重新铺筑沥青混凝土面层,严格控制摊铺、碾压工艺:摊铺机速度 $2 \sim 3$ m/min,熨平板预热至 $100^\circ\text{C}$ 以上,分层压实保证平整度、压实度均符合规范要求,对轻微开裂路面采用裂缝注胶封闭+微表处工艺予以精细修复。第三是配套结构修复,对电缆沟外倾段落先做注浆加固基础,纠偏复位后用钢筋混凝土予以补强,同时对变形缝、施工缝处的防水层及路面顺接部位一并妥善修复。

### 3.4 长期运营防护技术

维修加固后构筑长期防护体系需明确的三个方面:第一是布设结构健康监测系统,对路面变形、衬砌应力、渗漏水状况作实时监测,由此及时地发现早期隐患。第二是建立常态化养护机制,定时清理排水系统,对路面轻微病害尽早予以处治。第三是严格交通管控,限制超载超限车辆通行,切实降低重载交通对路面的疲劳损伤。

## 4. 工程实例应用

#### 4.1 工程概况

G553 蒙元线仙人洞隧道位于云南省红河州,全长 2364m,单洞双向两车道,净宽 9m、净高 5.0m,2002 年通车运营至 2023 年已达 21 年。隧道受仙人洞断裂带影响,围岩松散破碎、地下水丰富,花岗岩高岭土风化严重。运营检测发现,隧道两段落出现严重路面隆起、电缆沟外倾病害,且伴随衬砌渗漏水、内衬拱裂缝、路面抗滑性能不足等诸多问题,隧道结构与运营安全受到较为严重威胁,需进行系统加固改造。

#### 4.2 处治方案与实施效果

针对隧道病害特征,采用了地下水处治—结构注浆加固—内衬拱补强—路面修复的系统方案:首先对病害段落实施边墙降压孔排水与渗漏水引排封堵,以此从源头消除水害;其次采用钢花管注浆对仰拱、拱墙脚与破碎围岩进行整体加固,从而恢复基础承载能力;而对于病害集中段落增设 C35P8 防水钢筋混凝土内衬拱,实现结构整体补强;最后,凿除破损路面,然后重新铺筑沥青混凝土面层,并同时修复电缆沟、交安设施。

由于工程完工之后经第三方检测、运营监测两者联合验证,故可知病害段落路面变形已稳定,累计变形量小于 0.5mm,注浆加固后的结构密实度、承载力都符合设计要求,隧道渗漏水问题彻底解决,路面平整度、抗滑性能都符合《公路工程质量检验评定标准》,因此隧道运营安全等级有很大提高,处治方案十分成功。

### 5. 维修加固工程的监管管控要点

#### 5.1 施工准备阶段管控

要有计划、有系统地做好图纸会审及施工组织设计审查工作,对施工方案的可行性、针对性予以审核,同时对注浆参数、混凝土配合比、安全保通方案的合理性逐项检查,进场原材料、机械设备必须严格验收,即先查验出厂合格证、检测报告,再按规范要求抽检,凡不合格材料一律禁止使用,最后督促施工单位认真做好技术、安全交底。

#### 5.2 施工过程质量管控

严格执行首件认可制、工序报验制、隐蔽工程验收制,对注浆加固、混凝土浇筑、路面铺筑各工序都加以全过程控制:注浆工程重点检查钻孔参数、浆液配比、注浆压力及注浆量,及时做施工效果抽检,混凝土工程严格控制钢筋绑扎、模板就位精度、振捣工艺及养护措施,切实保证强度及抗渗等级符合设计要求,路面工程对基层压实度、沥青混合料摊

铺及碾压过程予以监控,逐段检测路面平整度、厚度及压实度。隐蔽工程验收合格者方能进入下道工序。

#### 5.3 安全与保通管控

由于隧道加固采用边运营边施工的模式,故安全管控成为首要关注的问题:要严格审查交通组织方案及应急预案,监督施工单位按《公路养护安全作业规程》规范布设警示标志、爆闪灯等安全设施,安排专职保通人员现场值守,对隧道内临时用电、高空作业、交叉作业逐项加以控制,杜绝违章作业,同时落实夜间施工照明、人员值守、安全巡查诸种措施,定期组织应急演练。

#### 5.4 验收与后期运维管控

工程完工以后按设计文件、规范的要求对各部分分项工程逐项验收,系统地检查工程实体质量及竣工资料,对不合格段落及时督促整改,验收合格后再督促施工单位编制隧道养护手册,向管养单位做清楚的技术交底,继而配合管养单位完成结构健康监测系统的调试及运维指导,厘清常态化养护的要点及频次。

### 6. 结语

公路隧道路面变形病害实质上是地质水文、设计施工、运营管理、环境劣化诸种因素共同作用的结果。因此,对西南山区富水破碎围岩隧道的路面变形病害,采用地下水降压排水、钢花管注浆加固、内衬拱结构补强、路面体系修复的成套技术方案,方能真正消除病害隐患。对此,监理单位要建立健全的全流程管控体系,对施工准备、过程质量、安全保通、竣工验收诸环节都加以系统的监督,而隧道管养单位则要有常态化养护及健康监测机制,重视早期病害的预防性养护,严格限制超载车辆通行,方能切实延长公路隧道使用寿命,也更有利于山区公路网的安全畅通。

### [参考文献]

- [1] 李国锋,李志厚. 云南公路隧道建设成就与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2023(S2): 10-26.
- [2] 雒成贤. 运营公路隧道典型病害成因专项检测分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(18): 127-129.
- [3] 苟建元. 公路隧道路面变形病害原因分析及维修加固探讨[J]. 甘肃科技, 2025, 41(02): 79-84.
- [4] 徐林生,陈扬勇,王知远等. 公路隧道路面工程病害实用处治技术研究[J]. 中外公路, 2016(6): 66-68.