

# 高速公路隧道初支变形侵限分析及处置对策

杨奎<sup>1</sup>,杨敬<sup>1</sup>,毛金龙<sup>1</sup>,李奥<sup>1</sup>,董飞<sup>1</sup>,谢朝阳<sup>2</sup>,孙伟亮<sup>3</sup>

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏南京 210019; 2.池州市公路管理服务中心,安徽池州 247099;  
3.中铁十四局集团有限公司,山东济南 250014)

**摘要:** 本文以某隧道为研究对象,重点阐述了对该隧道初期支护的变形量测和变形侵限原因的分析,针对隧道初步设计风险进行了影响因素的中层次分析评估,再基于进一步论证分析,制定了应对措施以控制变形的发展。分析结果表明:缓倾水平页岩和持续降雨是对初支变形影响较大的因素,而施工不当和监控量测预警不及时直接加速了变形的发展,最终造成初支侵限。为此,针对此类隧道变形侵限的特点和产生原因,制定临时支撑、双液注浆的应急处置措施,并紧跟二次衬砌的换拱整治方案,为其他类似工程可提供较好的经验借鉴。

**关键词:** 公路隧道;初支变形;侵限;处置方案

中图分类号: U455.7

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0300-05

## 0 引言

隧道初期支护是隧道施工过程中至关重要的一道工序,对保证开挖后隧道的稳定性、减少地层扰动和地表沉降等有着决定性的作用<sup>[1]</sup>。隧道初支变形侵限是一种常见的工程问题,有较大的安全隐患,若未及时处理,会造成隧道塌方等安全事故,威胁施工人员的生命财产安全。刘富成等<sup>[2]</sup>对隧道软岩变形破坏特征进行了研究,利用层次分析法确定了影响因素;赵华<sup>[3]</sup>对高地应力段的初支大变形采用临时支撑和注浆加固后实施换拱的措施进行了研究;窦继平<sup>[4]</sup>针对苏家湾黄土隧道初值侵限进行了验算,采用重新拟定支护参数、完善排水系统、预留变形量等措施进行处置;宋秉元<sup>[5]</sup>对软弱围岩中锁脚锚杆的作用进行了数值模拟;夏润禾等<sup>[7]</sup>针对复杂地质隧道的衬砌变形及开裂进行了分析,采取双层初期支护和双层衬砌的措施进行处置;柳果红等<sup>[8]</sup>针对大石岭隧道因雨水下渗岩体膨胀导致的变形进行了处置措施的研究。

本文通过对在建高速公路某隧道施工过程中出现的隧道初支侵限、开裂等一系列问题的产生原因进行分析,并根据现场实际情况,针对性地提出了应急措施和保障方案。

## 1 工程概况

本项目地处豫西黄土丘陵及中低山区,属秦岭余脉,地形起伏较大,设计标准为双向4车道高速公路,设计速度为80 km/h,隧道长3 100 m,标准段断面的宽度为11.1 m。项目区地形起伏较大,属中低山区,山体自然坡度为30°~85°,地表植被较好。隧道左右线均长3 680 m,属分离式特长隧道,隧道最大埋深约为349 m。

### 1.1 地质条件

隧址区主要地层为第四系(Q<sub>2</sub>)粉质黏土、元古界青白口系北大尖组(Z<sub>2</sub>bd)石英砂岩和白草坪组(Z<sub>2</sub>b)砂质页岩,如图1所示。隧道中III级围岩占隧道总长71.1%,IV级围岩均占21.3%,V级占7.6%。隧道的洞身条件以页岩、砂质页岩及石英砂岩为主,洞口附近上覆粉质黏土,洞身岩层为缓倾角构造,倾角为10°~13°,属缓侵层状水平岩层(见图1)。



(a)页岩 (b)石英砂岩

图1 隧道地质条件

该隧道实施双向掘进工法,总体已完成进度为15.8%,在出口端因初期支护侵限,整体对施工进度

收稿日期: 2023-11-17

作者简介: 杨奎(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程、隧道及地下工程相关设计和研究工作。

的影响较为严重,如图2所示。

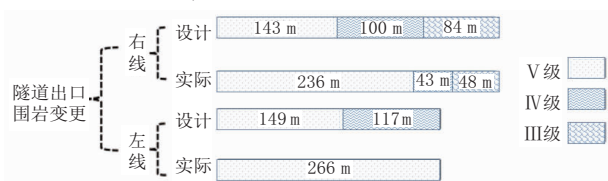


图2 隧道出口端实际围岩与设计情况对比

## 1.2 气象水文

隧道区地处中纬度内陆区,年平均降水量为662.4mm,最大降水量为1013.6mm,最小为456.1mm,年平均降水天数为97d。经勘察表明隧址区无地表水,地下水主要分布于石英砂岩和砂质页岩层裂隙

中,受大气降水影响,在节理裂隙不甚发育段汇集,形成地下含水水体。洞身经深孔钻探内未见地下水,洞体在地下水位以上。地下水以大气降水补给为主,预测涌水量为449.24 m<sup>3</sup>/d。

## 1.3 衬砌方案

针对该地区出现的软弱围岩、断层破碎带及缓倾水平岩层等情况,在IV、V级围岩主洞普通段共设置了4种复合式衬砌结构形式。设计考虑充分发挥围岩的自承载能力,根据隧道所处的工程地质条件,按新奥法原理设计洞身衬砌结构,隧道复合式衬砌参数如表1所示。

表1 隧道复合式衬砌设计参数表

项目名称	围岩级别					
	IV		V			
	一般段	加强段	一般段	加强段		
衬砌类型	IVa	IVb	Va	Vb		
初期支护	C25 喷混凝土	厚度/cm	18	22	24	26
	径向锚杆	直径/mm	φ22 砂浆锚杆	φ22 砂浆锚杆	φ25 注浆锚杆	φ25 注浆锚杆
		长度/cm	250	300	350	350
		间距(环×纵)/(cm×cm)	120×100	120×100	100×75	100×60
钢筋网	直径/mm	φ6	φ6	φ8	φ8	
	间距/cm	25×25	20×20	20×20	20×20	
	型号	格栅钢架	I16 型钢	I18 型钢	I20a	
钢架	型钢间距/cm	100	100	75	60	
	仰拱	—	—	I18 型钢	I20a 型钢	
二次衬砌	拱墙	C30 厚度/cm	40	40 钢筋混凝土	45 钢筋混凝土	50 钢筋混凝土
	仰拱	C30 厚度/cm	40	40 钢筋混凝土	45 钢筋混凝土	50 钢筋混凝土
超前支护	类型	—	φ25 超前锚杆	φ42 注浆小导管	φ42 注浆小导管	
	间距间距(环×纵)/(cm×cm)	—	40×300	40×300	35×300	
	长度/cm	—	450	450	450	
预留变形量/cm	7	8	10	12		

## 2 监控量测

2017年9月中旬,在隧道进口端左右洞IVb衬砌段设计掌子面附近均出现了拱顶沉降、拱腰收敛侵限的情况,拱顶沉降平均速率约为10mm/d,且无明显收敛迹象,左洞侵限长度达48m,右洞达32m,如图3和图4所示。根据测量显示,9月底右洞K44+960处拱顶沉降再次突然增大(5mm/d基准线),此时右洞K44+950处拱顶沉降最大,造成侵限达18cm;同时,左洞左侧拱腰处收敛侵限严重,最大侵限约20cm,钢架严重变形,初支与围岩剥离,混凝土背后出现空洞。现场对K44+940处初期支护的断面进行了扫描,发现初期支护最大变形处侵限达

19cm,如图5所示,继续发展将会产生较大规模的塌方,造成严重后果。

## 3 原因分析

隧道围岩的大变形是由于开挖施工引起了隧道围岩应力场的重新分布,围岩应力超过岩体的屈服强度,进而导致塑性变形、其自成拱能力减弱,若围岩变形得不到及时约束会形成塑性破坏,进一步发展会形成塌方及破坏衬砌结构。隧道大变形的影响因素很多,主要有地质条件、水文条件、勘察设计、施工工艺等。依据本隧道工程地质和水文地质特点,并结合初步设计阶段的风险源调查和以往工程实例,形成对导致此次变形侵限的原因层次结构分析图,

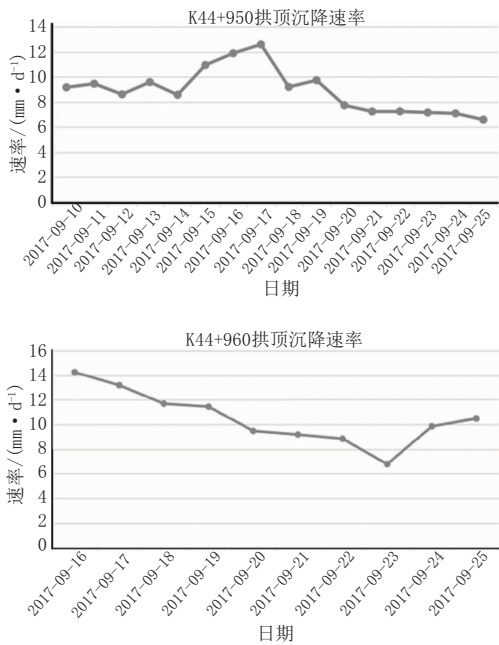


图3 拱顶沉降变化速率

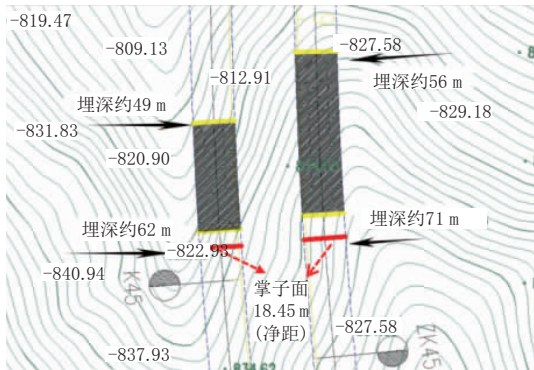


图4 变形侵限段平面位置图

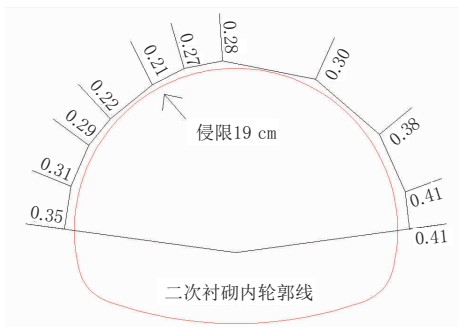


图5 ZK44+940 初期支护断面扫描图

如图6所示。



图6 隧道初支变形原因层次分析图

### 3.1 地质条件

根据勘察报告显示该段位置的地质为石英砂岩,开挖后洞身及掌子面左下部为石英砂岩,右上部为泥页岩,同时局部存在软弱夹层。石英砂岩的单轴

饱和抗压强度为 75 MPa,泥页岩的为 22 MPa,发育两组节理裂隙分别为  $J_1=212^\circ \angle 61^\circ$ 、 $J_2=346^\circ \angle 42^\circ$ 。

变形侵限区域主要集中在衬砌的拱顶与左拱肩,在实际的开挖过程中,该段落内的掌子面大部分范围均为砂质页岩,但拱部位置及左侧局部围岩的泥质含量高,岩体较为软弱,约占掌子面的 15%,如图7所示。掌子面左右侧围岩强度不一致,存在一定地质偏压,但在施工过程中该点没有被给予足够重视,是造成后期初支变形的影响因素之一。



图7 掌子面拱顶及左拱肩局部为软弱围岩

### 3.2 地下水

岩体的风化和侵蚀是导致隧道变形塌方的重要原因之一,其中水文条件的作用尤为明显。大量案例表明:突降的暴雨和长期的阴雨天气往往会破坏围岩的原有结构、软化岩土体、降低其强度及承载力,是导致塌方的一大诱因<sup>[8]</sup>。

9月底,隧道区域内连降大雨,因该段落隧道埋深已大于 50 m 以上,未见明显地下水渗漏。在开挖过程中,根据现场调查反馈,在掌子面只有零星水滴或局部潮湿,初支喷射的混凝土也无明显水渍,说明降雨引起的地下水补给对变形侵限的影响较小。

### 3.3 勘察设计

根据对该侵限段的超前地质预报 TSP(Tunnel Seismic Prediction)资料的分析,侵限段在约 20 m 的范围  $V_p/V_s$  增加,可能是该段存在地下水赋存区;其后纵波波速明显下降,横波基本无变化,长度约为 30 m,表明该区域可能岩体破碎、也可能是裂隙密集的软弱围岩带,如见图8所示。同时,TSP 预报显示该段有刚性岩层与软弱岩层的交替,说明可能存在围岩过渡段,纵波波速总体在 3 000 m/s 以上,说明围岩强度较高,如图9所示。

在实际开挖过程中,左右洞的围岩基本一致,掌子面大多为砂质页岩,部分为泥页岩,但在局部地段存在软硬交界(与超前地质预报相符)的情况,节理

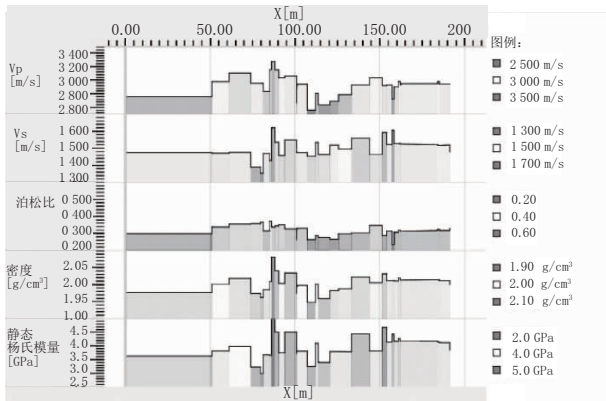


图8 TSP超前地质预报 Vp、Vs、泊松比、密度、杨氏模量谱

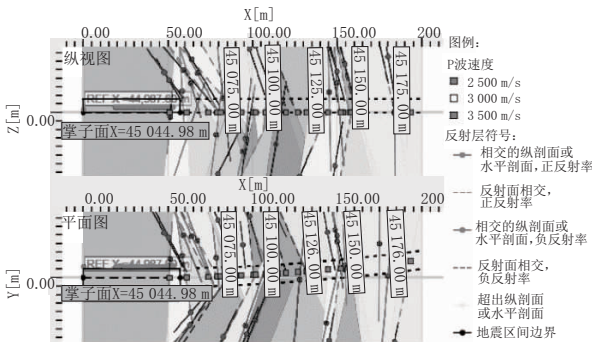


图9 侵限段 TSP超前地质预报 Y轴、Z轴方向解释成果

裂隙发育,岩体较破碎。经判断,该段范围内大部分断面围岩的自稳能力与勘察设计确定的IV级围岩基本相符。

### 3.4 施工工艺

根据现场检查结果验证,在隧道开挖过程中有比较严重的超挖现象。设计预留变形量8cm,在实际施工时预留却达20~30cm。因超挖而多施作的喷砼又作为新的附加荷载施加在初支钢架上,而无法与围岩形成良好的整体,反加大了钢架的变形,改变了设计的受力结构。

设计方案中,设置衬砌径向锚杆为每米21根φ22mm长度3m的砂浆锚杆,锁脚锚管为每米8根φ42mm长度3.5m,而在实际施工中二者的数量和质量与设计不符。隧道支护结构设计中充分考虑了缓倾水平岩层中系统锚杆的悬吊加固作用,而锁脚锚管的作用是尽可能限制钢拱架位移,以抵御围岩变形。施工在无法保质保量完成的情况下,施作的衬砌结构承载能力有限,易造成隧道初支侵限。

安全施工步距的保证是施工安全的另一个重要因素。隧道侵限段左右洞的掌子面基本平齐,若先行洞进行爆破施工,势必会对后行洞的围岩产生二次扰动,对初支产生不利影响。

### 3.5 监控量测

现场监控量测是新奥法设计与施工过程的重要

组成部分。通过对隧道进行监控量测,可预测和预报围岩变化,优化设计和指导施工,确保隧道的施工安全,使工程投资经济合理。通过对拱顶下沉、水平收敛等多项涉及围岩稳定性及支护合理与否的参数进行跟踪量测,可以实时确定合理的二次衬砌施工时间,但该隧道实际的监控量测并未能及时反馈并给出预警,这进一步致使了初支变形的深度发展。

根据对侵限段地质条件、地下水、勘察设计、施工工艺、监控量测等原因的充分分析,在造成本隧道初支变形侵限的因素中,其地质条件软硬不均具有较大影响,而施工不当和监控量测预警不及时则是导致初支侵限和深度发展的直接原因。

## 4 处理措施

### 4.1 应急处理

(1)封闭围岩:立即停止对掌子面的施工,使用喷射混凝土封闭开挖面,防止围岩继续风化,避免围岩坍塌。

(2)增设临时支撑:使用竖向钢支撑顶住拱顶,防止拱顶继续下沉;施作临时仰拱,以控制两侧初支收敛。

(3)注浆处理:对围岩与衬砌剥离产生的空洞处进行双液(水泥-水玻璃)注浆,形成具有一定强度的胶凝体-水花硅酸钙,起到加固围岩与粘结围岩与支护结构的作用。

### 4.2 后续保障

(1)二次衬砌、仰拱紧跟:采用“二衬跳打”方案,将二次衬砌的台车移到已经完成的下台阶及仰拱施工的位置,立即施作二次衬砌,并尽快使隧道封闭、使二次衬砌的安全步距达到规范要求,以形成整体承载。

(2)换拱处理:对局部侵限(面积小于2m²)小于5cm的部位,可对该部位进行凿除处理,将钢架保护层凿除,凿除后用C25混凝土进行回填、抹平处理,确保施工防水时不会将防水层刺破;对于大面积或整个拱架侵限并且大于5cm的情况,则必须采取局部换拱方案。

换拱钢架采用I18型钢,间距0.5m一根,钢架间设φ22钢筋进行连接,环向间距1m;并增设初期支护仰拱,仰拱钢架采用I18型钢,间距0.5m一根。钢架在初喷混凝土4cm后进行架设,在纵向连接筋焊接后完成复喷,内部保护层厚度不应小于2cm,换拱后及时施作Va型的二次衬砌。

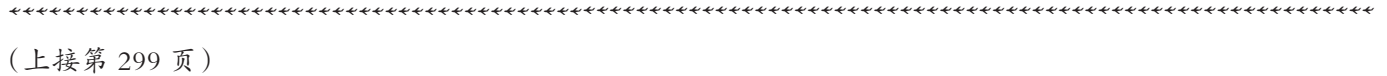
③监控量测:加强监控量测以检验整治措施及施工方法是否合理及安全,及时反馈量测信息,根据量测信息的分析结果,对整治的方法与措施及时做出调整与修正。

5 结 语

本文以某在建高速隧道为研究对象,针对施工过程中出现的初支变形侵限问题进行了深入的探讨和分析。通过对侵限段的地质条件、地下水、勘察设计、施工工艺、监控量测等原因进行梳理,确定本次隧道侵限的直接原因为系统锚杆、锁脚锚杆及安全步距等施工工艺不规范,间接原因为地质条件突变导致的均匀性差和监控量测预警不及时。经过对现场情况的合理分析判定,针对变形发展的应急控制和后续工程的实施,给出了相应的应急处置方案和保障方案,避免了风险的进一步扩大,确保了工程的顺利实施,经验证方案切实可行,可为其他类似工程提供较好的经验借鉴。

参考文献:

[1] 杨哲峰,高勇.地下隧道新奥法施工综述[J].水利规划与设计,2003(4):40-48.
[2] 刘富成,蒋宗鑫,陈建平.通省隧道变质软岩变形破坏灾变因子及其权重研究[J].安全与环境工程,2013,20(2):146-151.
[3] 赵华.高地应力段初支大变形换拱施工技术[J].铁道建筑技术,2014(5):93-96.
[4] 窦继平,陈德健.苏家湾隧道初期支护变形侵限处理措施及施工工艺的研究[J].现代隧道技术,2014(6):154-159,178.
[5] 宋秉元.锁脚锚杆在软弱围岩隧道中的应用[J].交通标准化,2014,42(15):210-212,217.
[6] 陈德健.苏家湾隧道初期支护变形侵限分析及处理措施的研究[J].北方交通,2015(2):102-106.
[7] 夏润禾,崔小鹏,周泉.复杂地质隧道衬砌变形分析与工程治理技术[J].铁道工程学报,2015(8):66-72.
[8] 柳果红,文艺.大石岭隧道右洞初支变形侵限换拱处理施工[J].广东公路交通,2016(4):97-100.
[9] 张晓今,钟毫忠,张超.浅埋山岭隧道软岩段塌方原因分析及处理技术[J].现代隧道技术,2018(2):201-207.
[10] 龚渠洪.浅谈铁路隧道衬砌常见施工质量问题和预防措施[J].现代隧道技术,2018(2):208-211.



(上接第 299 页)

参考文献:

[1] 张树仁,王宗林.桥梁病害诊断与改造加固设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
[2] 周杰锋.预应力碳纤维加固技术在莫大桥中的应用[J].特种结构,2019,36(2):57-60.
[3] 彭全敏,王海良,陈培奇.预应力碳纤维片材在桥梁加固中的发展现

状与展望[J].铁道建筑,2008(7):7-11.
[4] 陈华,张鹏,邓朗妮.预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的设计及应用[J].建筑科学,2010,26(7):39-51.
[5] JTG/T J22-2008,公路桥梁加固设计规范[S].
[6] GB 50728-2011,工程结构加固材料安全性鉴定技术规范[S].
[7] GB 50367-2013,混凝土结构加固设计规范[S].