

全风化砂页岩地层隧道二次衬砌开裂成因研究*

Research on the Causes of Secondary Lining Cracking of Tunnel in Fully Weathered Sand Shale Ground

崔建航¹, 张晓平¹, 汪祥国², 吴英淑³, 李玉生⁴, 樊文胜⁴, 肖敏⁴, 翁贤杰⁴

- (1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430000;
2. 中铁十一局集团第二工程有限公司, 湖北 十堰 442000;
3. 江西省交通运输科学研究院有限公司, 江西 南昌 330200;
4. 江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025)

摘要: 全风化砂页岩隧道施工过程中, 围岩过度变形易引发隧道二次衬砌开裂, 严重影响施工安全和线路运营。本研究以白竺三号隧道为研究对象, 通过现场裂缝调查和断面轮廓检测等技术手段, 结合隧址区围岩状况和水文地质条件, 采用数值模拟等方式综合分析了隧道二次衬砌开裂的原因。研究表明: 隧道衬砌受到软岩膨胀力和水压力的共同作用, 以及衬砌两侧围岩性质差异所带来的围岩应力不平衡释放, 最终导致纵向裂缝产生; 隧道的环向、斜向裂缝可分成三个区段, 左右两侧区段对应弯矩超出开裂弯矩, 裂缝主要为受弯破坏产生, 中间区段受力状态复杂, 裂缝可能是受弯、受拉和偏压共同作用导致。

关键词: 公路隧道; 风化砂页岩; 二次衬砌开裂; 成因分析

中图分类号: U455.91 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0003-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.003

CUI Jianhang¹, ZHANG Xiaoping¹, WANG Xiangguo², WU Yingshu³, LI Yusheng⁴,
FAN Wensheng⁴, XIAO Min⁴, WENG Xianjie⁴

- (1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. China Railway 11th Bureau Group Second Engineering Co. Ltd., Shiyan 442000, China;
3. Jiangxi Transportation Institute Co. Ltd., Nanchang 330200, China;
4. Jiangxi Provincial Communications Investment Group Co. Ltd., Nanchang 330025, China)

Abstract: During the construction of fully weathered sand shale ground tunnel, excessive deformation of surrounding rock is prone to cause the cracking of tunnel secondary lining. It will seriously affect construction safety and tunnel operation. The present study takes the Baizhu No. 3 tunnel as the research object. By means of field crack investigation, section profile detection and other technical means, combined with surrounding rock conditions and hydrogeological conditions of tunnel site, numerical simulation is used to comprehensively

* 基金项目: 湖北省自然科学基金杰出青年基金 (2021CFA081); 江西省交通投资集团有限责任公司科研项目“全风化页岩不良地质隧道开挖施工及其诱发的灾害控制关键技术研究” (2021C0005)。

作者简介: 崔建航 (1998—), 男, 硕士, 主要从事地下工程方面的科研工作。

通信作者: 张晓平 (1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事地下工程、岩土力学及工程地质等方面的研究工作。

收稿日期: 2023-01-10

analyze the causes of secondary lining cracking. The results indicate that the tunnel lining is subjected to the combined action of soft rock expansion force and water pressure, as well as the release of surrounding rock stress imbalance caused by the difference in the properties of surrounding rock on both sides of the lining, which eventually leads to the formation of longitudinal cracks. The circumferential and oblique cracks of the tunnel can be divided into three sections, and the corresponding bending moment of the left and right sections exceeds the cracking moment. The cracks are mainly generated by bending failure, and the stress state of the middle section is complex. The cracks may be caused by the combined action of bending, tension and bias.

Keywords: highway tunnel; weathered sand shale; cracking of the secondary lining; cause analysis

0 引言

高速公路越岭隧道作为一种隐蔽工程,因勘察条件的限制,设计和施工过程中存在诸多不确定性因素。尤其是软岩隧道,隧址区多为页岩、泥岩等,围岩松散破碎,遇水易软化膨胀,单轴抗压强度较低,稳定性极差,隧道开挖后围岩变形大、变形时间长且变形速率较快,常引发钢拱架扭曲变形、初期支护挤出开裂,严重时甚至导致二次衬砌和仰拱开裂、洞室压溃坍塌等^[1-2]。公路隧道中二次衬砌为整体模筑,因此结构较为完整,不同种类的病害往往是相互影响的,但最终几乎都会以结构裂缝的形式表现出来^[3]。裂缝的存在往往又会引发渗漏水 and 钢筋腐蚀等,导致隧道衬砌承载力和结构耐久性降低,从而影响交通运输,甚至造成严重的财产损失和人员伤亡。

隧道衬砌病害发生后,查明病害的成因方可制定有效的加固修复措施,因此隧道衬砌开裂的成因分析一直是隧道病害研究中的关键^[4]。文献调研结果表明,众多学者已经针对公路隧道衬砌开裂的机理进行了研究分析。杨华等^[5]利用有限元软件,分别计算了偏压、塑性地压、松弛荷载三种工况下二衬纵向裂缝的分布和发展规律,为病害成因分析提供了指导。来弘鹏等^[6]通过现场实测和数值模拟,分析了黄土地区隧道衬砌开裂的成因,结果表明黄土地层浸水后变形增大、强度降低,使得衬砌结构受力恶化,从而引发二衬开裂。黄宏伟等^[7]通过统计分析、现场调查和数值模拟等手段对浙江区域衬砌开裂的隧道进行了研究,结果表明偏压、不均匀沉降、滑坡、衬砌背后空洞以及围岩松弛压力是衬砌开裂的主要原因。李皓晖等^[8]结合现场调查和室内试验,研究

了软岩地区二次衬砌开裂的机理,研究发现软岩蠕变、地形偏压和地下水是衬砌开裂的主导因素。刘德军等^[9]对国内大量的衬砌开裂情况进行了统计分析,采用扩展有限元对衬砌裂缝开裂机制进行了探讨,研究表明衬砌偏心距是控制裂缝发展的主导因素。王显进^[10]采用数值模拟方法对全风化闪长岩地层隧道衬砌开裂原因进行了研究,结果表明隧址区围岩软化越严重,衬砌结构所受的拉应力越大,最终导致衬砌开裂。张芳等^[11]采用杂交有限元-离散元数值模拟方式,揭示了偏压、拱顶空洞和松弛地压三种不良工况下隧道二次衬砌的开裂机理,为后期的治理提供了依据。孟陆波等^[12]采用现场监控量测和数值模拟的方式研究了炭质千枚岩地层隧道二次衬砌开裂的原因,结果表面围岩等级低和二次衬砌措施过早导致衬砌开裂。宋浪等^[13]通过现场试验和监控量测分析了软岩地层隧道二次衬砌开裂的原因,研究表明地质偏压、围岩蠕变、初期支护施做不及时、二衬过早承载围岩压力是二衬开裂的主要原因。石继训等^[14]对大广高速二衬开裂情况进行了详细调查,并采用数值模拟的方式研究了开裂原因,结果表明,衬砌钢筋位于受压区,不能有效约束裂缝发展是二衬开裂的主要原因,并针对性地提出了凿槽嵌钢架、套拱、粘贴钢板三个方案。于洪钦等^[15]采用现场调查的方式对祁连山隧道二次衬砌开裂的机理进行了研究,结果表明,斜向裂缝的成因主要是混凝土干缩,环向裂缝是二衬脱模失误及其背后空洞造成的,月牙型裂缝是由于模板对上一版二衬顶推力过大导致的。

综上所述,众多学者通过现场调查、数值模拟和试验测试等方法对隧道二次衬砌开裂的成因机理进行了初步研究。多数研究简单地分析了偏

岩土力学

压、衬砌背后空洞等不良工况，衬砌开裂原因和产生机制尚需要进一步研究。因此本文结合开裂隧道的具体状况，从区域工程地质条件入手，查明衬砌开裂的特征及病害成因，为后续制定针对性的治理措施提供基础，保护隧道的运营安全。

1 工程概况

1.1 项目概述

白竺三号隧道始于萍乡市湘东区白竺乡大园里村附近，止于萍乡市湘东区白竺乡红坝榨下村

附近，为一分离式隧道，左线 ZK26+205~ZK27+280 区间和右线 YK26+200~YK27+295 区间总长度分别为 1075 m 和 1095 m，最大埋深分别为 116 m 和 107 m，萍乡端洞口采用端墙式，莲花端采用削竹式。根据《公路隧道设计规范》JTG3370.1-2018^[16]规定，该隧道属于公路长隧道。隧道采用马蹄形断面，净空（宽×高）尺寸为 10.25 m×5.0 m，按新奥法原理进行设计，采用复合式衬砌结构，初期支护以锚杆、喷射混凝土、钢拱架等为主，针对不同级别围岩的支护参数见表 1。

表 1 既有隧道衬砌结构参数表
Table 1 Structural parameters of existing tunnel lining

围岩等级	支护参数	IV 级围岩		V 级围岩			
		FS4b	FST4	FS5a	FS5b	FS5c	
初期支护	喷射 C30 混凝土/cm	21	25	25	25	25	
	锚杆	长/m	φ22 砂浆锚杆 3.0 m	φ22 砂浆锚杆 3.0 m	φ22 砂浆锚杆 3.5 m	φ22 砂浆锚杆 3.5 m	φ22 砂浆锚杆 3.5 m
		间距/cm	120×175	100×60	100×60	100×75	100×50
	钢拱架	规格	I14	I18	I18	I18	I18
间距/cm		75	60	60	75	50	
二次衬砌	钢筋网/cm	φ6.5 间距 20	φ6.5 间距 20	φ6.5 间距 20	φ6.5 间距 20	φ6.5 间距 20	
	拱、墙/cm	砣 40	钢筋砣 60	钢筋砣 50	钢筋砣 45	钢筋砣 50	
	仰拱/cm	砣 40	钢筋砣 60	钢筋砣 50	钢筋砣 45	钢筋砣 50	

1.2 工程水文地质情况

如图 1 所示，白竺三号隧道沿线地质构造复杂、断裂构造发育，隧道先后穿越 4 条断层破碎带。开挖过程中，发生有不同程度的由不良地质引起的塌腔、溶腔涌水、初支侵限和掌子面涌水等问题。根据现场地质调绘及钻孔资料分析，隧道区地层结构由上而下依次为第四系粉质黏土及

碎石土、泥盆系上统洋湖组麻山组并层石英砂岩、绿泥石英砂岩、砂质页岩夹鳞状赤铁矿、白云质灰岩、泥灰岩夹钙质砂、页岩等，以全、强风化砂页岩为主。隧道区地表水主要分布于进出口及中部低洼地段的山间小谷中，常年有水，受季节性影响变化大，地下水主要为风化带网状孔隙裂隙水、基岩风化裂隙水及构造裂隙水。

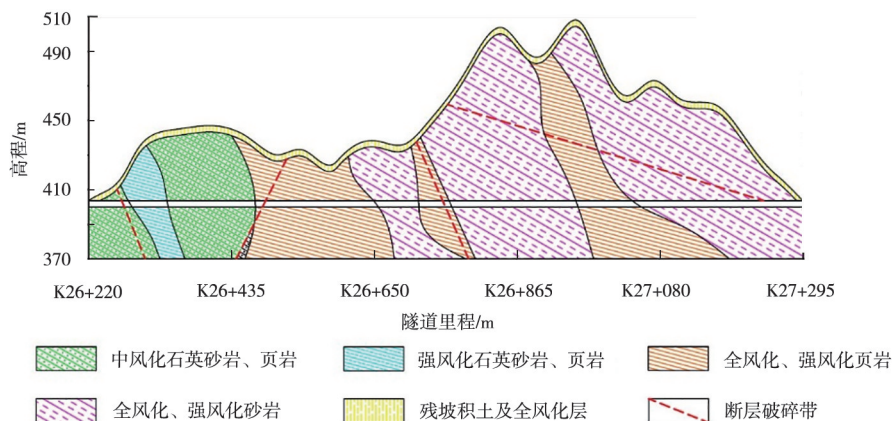


图 1 白竺三号隧道地质纵断面图
Fig. 1 Geological profile of Baizhu No. 3 Tunnel

2 隧道衬砌开裂调查

2.1 裂缝分布情况统计

白竺三号隧道裂缝分布概况如图 2 所示。可以看出,白竺三号隧道左右线裂缝分布情况不同,左洞裂缝分布较为均匀且数量较少,皆为环向裂缝和斜向裂缝,裂缝所处位置多为 IV、V 级围岩变化段及靠近 F2BZ3、F18 断层破碎带等位置。右洞裂缝基本分布于出口位置,主要分布范围为 YK26+800~YK27+295,总长 495 m,该段围岩主要为全强风化页岩及石英砂岩,且有断层破碎带穿过,裂隙发育,围岩结构碎裂,均为 V 级围岩,裂缝类型包括环向、纵向、斜向以及环纵交叉网状裂缝,形式较为复杂。

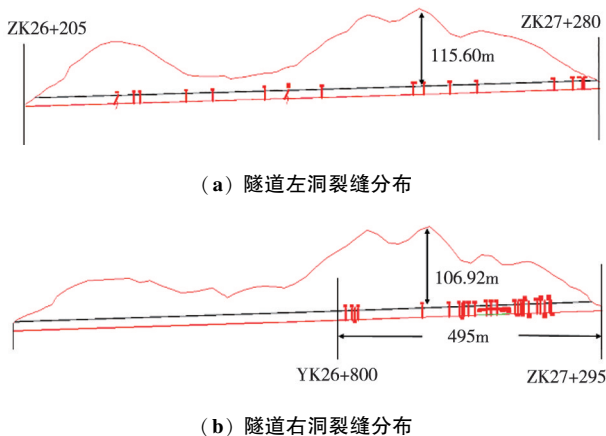


图 2 白竺三号隧道衬砌裂缝分布图

Fig. 2 Lining crack distribution of Baizhu No. 3 Tunnel

针对白竺三号隧道左、右洞裂缝分布情况进行了排查,隧道左右洞裂缝分布形式差异较大,左线裂缝长度一般在 1.5 m~7 m 之间,而右线隧道裂缝种类增多,不仅产生纵向裂缝,还生成了纵、环向交叉的网状裂缝,分布于 YK27+47~YK27+135 范围内。按照裂缝分布的位置情况来看,总体上裂缝在隧道左右边墙分布比例一致,但网状裂缝大部分位于隧道左边墙处。

2.2 裂缝发育段断面轮廓检测结果

根据隧道衬砌所在的围岩等级及衬砌类型,选取了 12 个具有代表性的断面进行二衬内轮廓检测,检测结果显示工后断面轮廓整体呈拱顶-拱腰外扩和边墙底部内侵的趋势,拱顶外扩最大值可

达 0.153 m,而两侧边墙内侵最大值可达 0.569 m。具体情况见表 2。

表 2 断面轮廓检测汇总表

Table 2 Summary of section profile detection					
序号	里程桩号	标准面积 /m ²	测量面积 /m ²	最大超挖 /m	最大欠挖 /m
1	YK27+070	64.36	63.66	0.081	0.569
2	YK27+080	64.36	63.60	0.129	0.534
3	YK27+090	64.36	63.49	0.089	0.562
4	YK27+100	64.36	63.50	0.153	0.575
5	YK27+110	64.36	63.41	0.037	0.515
6	YK27+120	64.36	63.35	0.041	0.495
7	YK27+130	64.36	63.07	0.041	0.497
8	YK27+140	64.36	63.29	0.101	0.501
9	YK27+150	64.36	63.63	0.069	0.508
10	YK27+160	64.36	64.07	0.094	0.525
11	YK27+200	64.36	64.47	0.116	0.503
12	YK27+230	64.36	64.29	0.101	0.455

3 隧道结构裂缝成因分析

3.1 纵向裂缝成因分析

3.1.1 围岩特性分析

根据隧道纵断面图(图 1)和裂缝分布图(图 2)可知,纵向裂缝隧址区域所处地层基本为全风化砂岩页岩地层,节理裂隙发育,岩层具有一定的弱膨胀性,由于该段与 F18 断裂带距离较近,受该断裂带影响,隧址内裂隙岩体破碎,成洞性差,围岩稳定性较弱,极易引发二衬开裂。据地质勘查情况显示,该段地质进行勘探时地下水位高于洞顶,属于地下水的富集地带,开挖中地下水多呈淋雨状或涌流状出水,地下水资源丰富,隧道开挖打破了原有的地下水循环系统,基岩裂隙水沿微裂隙不均匀渗透,水理性质极差的全风化砂岩页岩遇水软化后产生大面积变形,加速了隧道仰拱的开裂。

根据施工期的超前地质预报及掌子面开挖时的围岩情况可知,在白竺三号隧道右线纵向裂缝段,掌子面左右围岩情况不一致,呈现“左硬右软”的分布情况(见图 3)。由于隧道左右两侧围岩情况存在软硬差异,因此在运营期受降雨、围岩断层等不利因素的影响,衬砌两侧可能会受到不平衡的围岩压力。

岩土力学



图3 开挖时掌子面围岩情况

Fig.3 Surrounding rock conditions of the face during excavation

3.1.2 初期支护变形趋势分析

由于纵向裂缝段围岩情况相似，因此在这里选择 YK27+113 和 YK27+083 两个断面的初支变形监测情况作为代表进行分析。分析这两个断面的周边收敛和拱顶沉降时程曲线图（图 4、图 5）可知，该段围岩变形的总趋势为拱顶下沉、周边内收敛变形，两个断面的拱顶最终沉降为 300 mm 以上。隧道断面的沉降和收敛在初支施作后产生较大发展，因此在产生较大变形后施工方进行了换

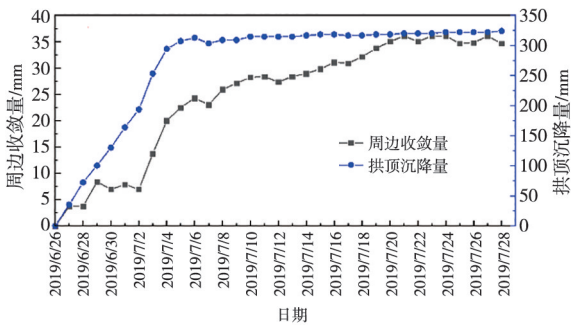


图4 YK27+113 断面周边收敛和拱顶沉降时程曲线图 Fig.4 YK27+113 section convergence and arch settlement time history curve

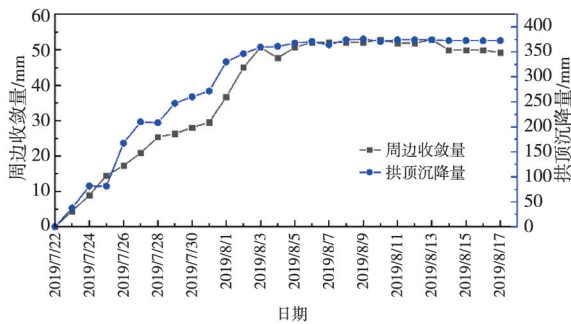


图5 YK27+083 断面周边收敛和拱顶沉降时程曲线图 Fig.5 YK27+083 section convergence and arch settlement time history curve

拱处理（YK27+113 断面 7 月 4 日换拱，YK27+083 断面 8 月 1 日换拱），换拱后初支的变形明显减小，拱顶基本不再产生沉降变形，隧道收敛基本趋于稳定。

3.1.3 纵向裂缝反演分析

根据隧道二衬的病害情况，这里采用荷载-结构法，并结合曙光软件反推产生纵向裂缝段衬砌背后的受力模型。根据实际衬砌的开裂特征以及采用激光断面仪所实测的隧道轮廓变形趋势再现裂缝的开裂情况，从而确定开裂段衬砌的受力特征。

由于该纵向裂缝段内衬砌的围岩情况相同，均为 V 级围岩，隧道埋深基本为 50 m 以上，属于深埋隧道，因此任意一个断面的受力情况都可代表该段衬砌的整体受力特征，因此这里选取 YK27+100 断面进行建模。由于该段围岩较破碎，根据规范规定，采用荷载结构法计算时，拟取 V 级围岩段落二次衬砌承担 70% 的荷载，所选断面的衬砌结构参数和围岩参数由表 3、表 4 所示。

表3 衬砌结构材料参数 Table 3 Material parameters of lining structure

衬砌类型	弹性模量 E /kPa	衬砌厚度 /cm	重度 γ / (kN/m ³)	主筋类型	主筋直径 /mm
FS5a	3e ⁷	50	25	HRB400	20

表4 围岩参数 Table 4 Surrounding rock parameters

衬砌类型	围岩分级	重度 γ / (kN/m ³)	计算内摩擦角/ $^{\circ}$	弹性抗力系数 / (MPa m ⁻¹)
FS5a	V	19.5	45.00	150.00

根据纵向裂缝产生时可能的受力状态，在衬砌的左侧施加侧向水平附加应力以及竖向附加应力，其对应的荷载-结构模型如图 6 所示。随着水平荷载的增大，结构的弯矩图会产生如图 7 所示的变化，隧道左拱腰内侧会产生弯矩，并且该弯矩会随着水平荷载的增大而增大。由软件分析可知，当水平荷载值为 200 kN/m²，竖向附加应力为 -10 ~ -50 kN/m² 梯度施加时，如图 7 所示左拱腰位置的开裂验算失败，衬砌产生裂缝，裂缝开裂位置与现场实测裂缝位置基本一致。

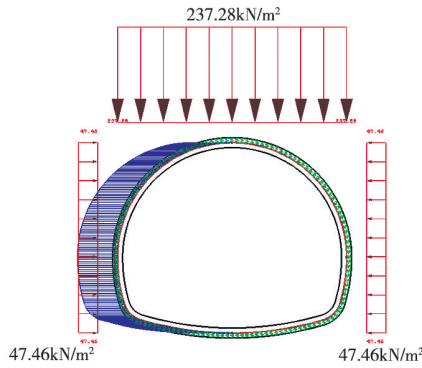


图 6 荷载-结构模型
Fig. 6 Load-structure model

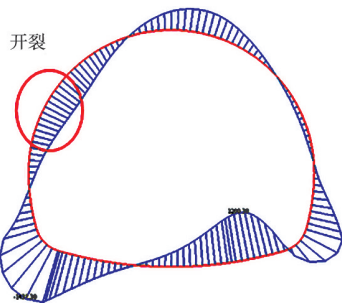


图 7 弯矩图
Fig. 7 Bending moment diagram

监测与数值模拟条件下正常情况隧道开挖后断面与产生纵向裂缝段开挖后断面对比如图 8 所示，监测对比断面为 YK27+200 断面。由图 9 可知，数值模拟结果相对于正常断面开挖后轮廓左侧拱腰向右移动 3.97 cm，拱顶下沉 1.63 cm，右侧拱腰同样向右移动 1.57 cm；对于监测结果，其左拱腰向右移动 5 cm，拱顶沉降 6.3 cm，左侧拱腰向左移动 6.7 cm。具体而言，监测结果与数值模拟结果在拱顶、左拱腰处变形情况基本一致。

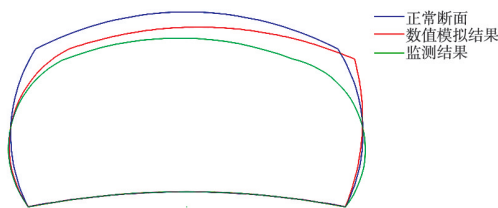


图 8 不同结果下断面轮廓对比
Fig. 8 Comparison of sectional profiles under different results



图 9 计算段弹性地基梁模型
Fig. 9 Beam model of elastic foundation in calculation section

3.1.4 成因综合分析

结合近期裂缝发展情况以及纵缝分布形式、

地质情况以及断面收敛情况进行综合分析，对纵向裂缝产生原因分析如下：(1) 地质因素。该段与 F18 断裂带距离较近，受该断裂带影响，隧址内裂隙岩体破碎，成洞性差，围岩稳定性较弱；隧道开挖后，由于掌子面左右两侧围岩情况不一致，隧道两侧围岩应力释放不均衡，右侧围岩由于较大的初支变形应力释放较好，左侧尚未完成围岩应力释放，最终导致左右两侧围岩压力情况不均衡，隧道受到偏压；(2) 地下水影响。由于该段左侧围岩为弱膨胀性岩石，受水的作用，衬砌左侧会产生弱膨胀力。隧道周围岩体较为破碎，有利于雨水的富集，在丰水季和枯水季衬砌周围所受水压力会产生明显变化，而当地 3、4 月为当地丰水季的开端，衬砌周围所受水压力增大。

3.2 隧道环向裂缝成因分析

3.2.1 模型建立

本部分选取右线隧道裂缝集中段 (YK26+770~YK27+295) 为重点研究对象，以出洞口处作为坐标原点建立弹性地基梁分析模型 (图 9)。隧道采用二维梁单元模拟，根据地层分布与荷载分布特性，将隧道分为 4 段，各段长度分别为 20 m、45 m、380 m、80 m。将隧道视为整体不考虑接缝间弹簧问题，管段下部地层采用地基弹簧模拟，各段弹簧单元数目分别为 5 个、9 个、76 个、16 个，材料参数取值参考上文第 3.1.3 节。

3.2.2 荷载取值及地层刚度取值

以白竺三号隧道设计图为基础，参照规范计算方法，对深埋段与浅埋段分别计算，采用分段线性荷载形式施加在隧道模型上，围岩荷载计算结果及施加荷载解析场如表 5 所示。

表 5 计算段荷载计算结果及解析场表达式
Table 5 Load calculation results and analytical field expressions in the calculation section

坐标	埋深/m	荷载/kPa	解析场
0	0	0	$P = -12x$
-20	12	240	
-20	12	240	$P = -0.267x+234.7$
-65	30	252	
-65	30	252	$P = 240$
-445	>30	240	
-525	>30	240	

注：以出洞口为坐标原点，隧道方向为 x 轴负向。

根据隧道沿线地勘报告，确定隧道底部不同岩性范围，初步选取不同地质段地基抗力系数取

岩土力学

值范围，对于有实测沉降数据段，以隧道沉降曲线为基准，通过调试地基弹簧刚度使得梁产生的位移与实际监测结果接近，得出与实际监测结果比较接近的一组地基弹簧刚度。反演计算所得的梁单元产生的位移与实践监测结果对比如图 10 所示，弹簧刚度取值见表 6。

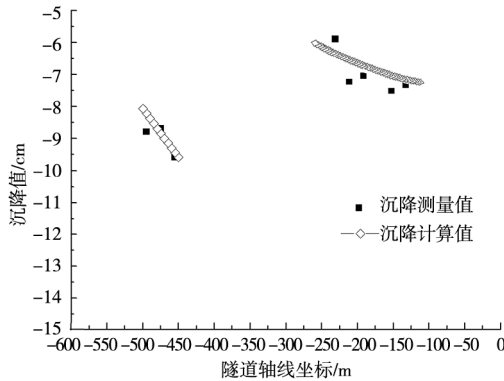


图 10 隧道沉降对比图
Fig. 10 Comparison of tunnel settlement

表 6 计算段地层抗力系数及弹簧刚度取值表
Table 6 Formation resistance coefficient and spring stiffness value table of calculation section

梁单元编号	坐标区间	围岩等级	地层抗力系数 /kPa m ⁻²	弹簧个数	弹簧刚度 /kN m ⁻¹
1	0 ~ -20	V	100	5	4800
2	-20 ~ -65	V	100	9	6000
3	-65 ~ -445	V	150	76	10068
4	-445 ~ -525	IV	250	16	15000

注：以出洞口为坐标原点，隧道方向为 x 轴负向。

3.2.3 计算结果

(1) 轴线沉降

由计算短轴线沉降云图 (图 11) 及沉降数据图 (图 12) 可知，本段隧道整体沿轴线呈现不均匀沉降状态，最大沉降 12.7 cm，位于距离洞口 130 m (断面 YK27+165) 处。本计算段长 525 m，其中 YK26+770~YK26+850 段围岩地质较硬，为 IV 级围岩，YK26+850~YK27+295 为长距离 V 级围岩区间，整体地质情况较差。由于受到左侧地质及右侧洞门约束，隧道整体沉降中间大、两端



图 11 计算段轴线沉降云图
Fig. 11 Settlement nebulae of calculation section axis

小，形状表现为凹槽形。

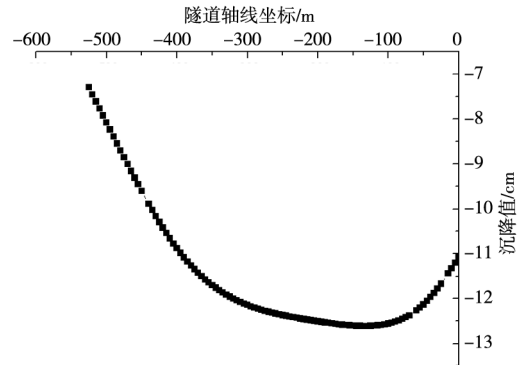


图 12 计算段轴线沉降数据图
Fig. 12 Calculation section axis settlement data chart

(2) 截面剪力

由计算段剪力云图 (图 13) 及剪力数据图 (图 14) 可知，计算段隧道最大剪力发生在洞门 (断面 YK27+295) 处，最大剪力数值 4000 kN。除此之外，在出洞口处，围岩荷载变化段 (断面 YK27+235) 及左侧围岩地质变化处 (YK26+845)，有明显的剪力极值。根据计算，截面最大剪应力 0.186 MPa，远小于 C30 混凝土抗剪强度 (2.4 MPa)，并不能造成直接剪切破坏。

(3) 截面弯矩

由隧道弯矩云图 (图 15) 及弯矩数据图 (图

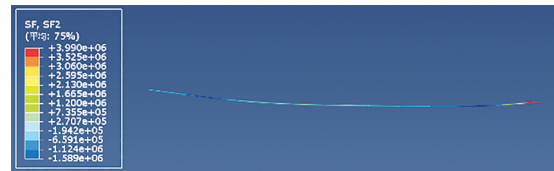


图 13 计算段截面剪力云图
Fig. 13 Shear cloud of calculation section

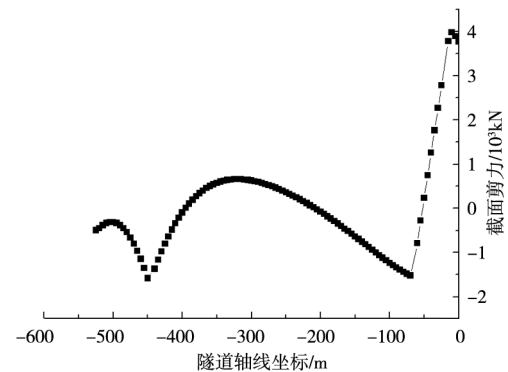


图 14 计算段截面剪力数据图
Fig. 14 Data diagram of shear force in calculation section

16) 可以看出, 截面弯矩沿隧道轴线波动变化, 根据上图可将隧道主要分为 3 个裂缝区段。区段①、区段③对应弯矩较大部位 (超出开裂弯矩), 可判定裂缝主要为受弯破坏产生; 区段②处存在纵向裂缝, 可能存在偏压情况, 同时剪力相对较大, 虽然弯矩数值较小, 但受力状态复杂, 可能是受弯、受拉、偏压共同作用导致破坏。

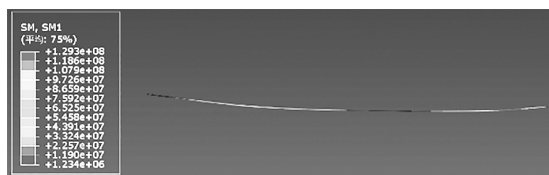


图 15 计算段截面弯矩云图

Fig. 15 Computed section bending moment nephogram

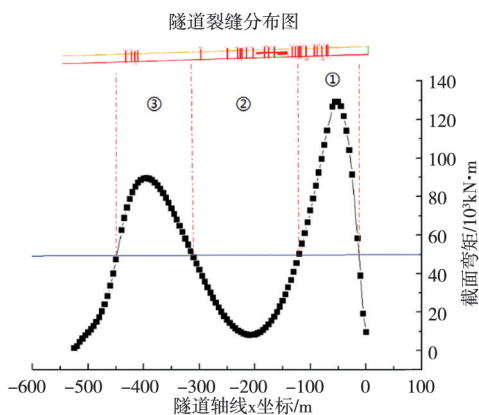


图 16 计算段截面弯矩数据图

Fig. 16 Bending moment data of calculation section

4 结论及建议

(1) 隧道左线裂缝分布较为均匀, 右洞裂缝基本分布于出口位置, 左线裂缝形式以环向为主, 裂缝数量较少, 右线分布纵向裂缝和较为密集的网状裂缝, 且主要位于左边墙及左拱腰附近, 其余地方仍零星分布环向与斜向裂缝。

(2) 对于纵向裂缝的产生, 是由于该段隧道接近 F18 断层, 导致该段隧道附近围岩破碎情况较为严重, 围岩稳定性较差; 全风化砂页岩类土质岩体具有一定的弱膨胀性, 初期支护施工后受水的作用, 隧道衬砌会受到膨胀力以及水压力等共同作用, 再加上衬砌两侧围岩性质差异所带来的围岩应力不平衡释放, 使隧道结构受到不平衡的围岩压力, 最终导致纵向裂缝产生。隧道的环向、斜向裂缝可分成三个区段, 左右两侧区段

对应弯矩较大部位 (超出开裂弯矩), 可判定裂缝主要为受弯破坏产生, 中间区段受力状态复杂, 可能是受弯、受拉、偏压共同作用导致破坏。

(3) 建议对目前出现的全部裂缝进行封缝处治, 对于目前已经贯通的裂缝以及纵向开裂段, 在封缝处治后, 在相应位置布设测点, 进行 1~2 年的结构长期监测。

参 考 文 献

- [1] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程地质力学研究进展 [J]. 工程地质学报, 2000 (1): 46-62.
- [2] 田四明, 王伟, 唐国荣, 等. 川藏铁路隧道工程重大不良地质应对方案探讨 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (5): 697-712.
- [3] 刘德军, 仲飞, 黄宏伟, 等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (11): 178-199.
- [4] 刘海京, 夏才初, 朱合华, 等. 隧道病害研究现状与进展 [J]. 地下空间与工程学报, 2007 (5): 947-953.
- [5] 杨华, 张文正. 公路隧道二次衬砌纵向裂缝非线性数值模拟研究 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (5): 46-51.
- [6] 来弘鹏, 杨晓华, 林永贵. 黄土公路隧道衬砌开裂分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27 (1): 45-49.
- [7] 黄宏伟, 刘德军, 薛亚东, 等. 基于扩展有限元的隧道衬砌裂缝开裂数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (2): 266-275.
- [8] 李皓晖, 虞晓卫, 张旺兴, 等. 软岩隧道衬砌开裂机理分析及预防措施 [J]. 施工技术, 2014 (18): 74-77.
- [9] 刘德军, 黄宏伟, 岳清瑞, 等. 隧道衬砌张拉裂缝开裂机制及快速修复方法初探 [J]. 土木工程学报, 2015 (S1): 236-243.
- [10] 王显进. 隧底围岩软化对鹰鹞山隧道衬砌结构开裂影响的数值分析 [J]. 铁道建筑技术, 2015 (4): 70-74.
- [11] 张芳, 王淑鹏, 张国锋, 等. 基于 FDEM 的隧道衬砌裂缝开裂过程数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (1): 83-90.
- [12] 孟陆波, 潘皇宋, 李天斌, 等. 鹞鹞山隧道二次衬砌开裂机理及支护时机探讨 [J]. 现代隧道技术, 2017, 54 (2): 129-136.
- [13] 宋浪, 张红义, 胡鹏. 梅家沟隧道二次衬砌开裂机理与防治措施探讨 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (S2): 278-284.
- [14] 石继训, 冉利刚. 隧道二次衬砌开裂原因分析及加固方案比选 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (S1): 575-580.
- [15] 于洪钦, 齐军, 刘怀荣, 等. 祁连山隧道二次衬砌混凝土开裂原因及整治方案研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (1): 217-222.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3370.1-2018. 公路隧道设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.