

层状围岩隧道裂缝机理分析与防治技术

徐荣文¹, 张 建^{1,2}, 连 鹏¹, 王 文¹, 成 昭¹

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 依托在建公路隧道仰拱填充顶面及二次衬砌纵向裂缝病害, 采用理论分析、数值计算等方法对隧道出现裂缝及其分布范围的机理进行分析, 通过理论推导可得到层状节理岩体中破坏塑性区的近似分布特征, 利用有限元软件对二次衬砌、仰拱及仰拱填充进行受力分析, 分析结果表明: 倾斜岩层存在的情况下, 隧道衬砌结构内力显著增加; 仰拱填充内设置中心水沟改变了填充顶面的应力分布; 层状围岩的破坏塑性区分布受岩层倾角影响较大, 与裂缝分布范围相吻合。根据倾斜岩层受力特征制定锁脚及系统长锚杆的方案, 为隧道病害处治以及支护方案优化提供了依据。

关键词: 隧道; 倾斜岩层; 衬砌裂缝

中图分类号: U451⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0197-05

Mechanism Analysis and Prevention Technology of Layered Surrounding Rock Tunnel Crack

XU Rongwen¹, ZHANG Jian^{1,2}, LIAN Peng¹, WANG Wen¹, CHENG Zhao¹

(1. Cansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Relying on the longitudinal cracks on the top surface of invert filling and secondary lining of the highway tunnel under construction, the mechanism of cracks and their distribution range of tunnels are analyzed by the methods of theoretical analysis and numerical simulation. Through the theoretical derivation, the approximate distribution characteristics of the failure plastic zone in the layered jointed rock mass can be obtained. The finite element software is used to analyze the stress of secondary lining, invert and invert filling. The results of the analysis show that the internal force of the tunnel lining structure increases significantly in the presence of inclined rock formations. The central ditch set in the invert filling can change the stress distribution of the top surface of the filling. The distribution of the failure plastic zone of the layered surrounding rock is greatly affected by the dip angle of the rock layer, which is consistent with the distribution range of cracks. According to the stress characteristics of the inclined rock formation, the schemes of locking foot and system long bolt are formulated, which provides a basis for the treatment of the tunnel disease and the optimization of the supporting scheme.

Keywords: tunnel; inclined rock formations; lining cracks

0 引 言

随着我国基础设施快速地向西部地区推进, 对高等级公路的建设需求不断增大。我国西部为多山区域, 修建隧道的数量也越来越多, 隧道穿越的工程地质条件也是越来越复杂。隧道衬砌裂缝产生的原因主要包含设计、施工、管理以及工

程地质条件等方面因素^[1-2], 当隧道穿越层状软弱围岩时, 由于岩层节理、倾角的存在, 隧道周围围岩岩体强度明显地呈各向异性, 对隧道稳定性有一定影响。

隧道穿越层状围岩时的变形破坏特征及衬砌结构受力特性已有不少学者进行了大量研究。隧道竖向位移、水平位移以及最大主应力等随岩层倾角的增大呈现先增大后减小的规律变化^[3]。邓彬^[4]认为在倾角一定的情况下, 随着岩层厚度的增加, 偏压作用愈加明显; 刘金松^[5]研究表明在倾斜层状围岩中隧道衬砌结构边墙部位在极限状态下存在最危险断面; 孟陆波等^[6]探明了高地应力层状软岩隧道岩层

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(5220081849; 52068044)

作者简介: 徐荣文(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事隧道工程设计工作。

通信作者: 张建(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 从事公路隧道设计方法研究工作。电子邮箱: 16813698@qq.com

倾角、岩层走向与隧道轴线夹角、最大主应力与岩层面夹角等因素与非对称变形部位之间的20条强关联规则;对于倾斜岩层巷道围岩变形及破坏特征的研究,孙晓明等^[7],张明建等^[8],杨帆等^[9]通过现场试验、理论分析、数值模拟以及工程应用研究,提出倾斜岩层巷道的变形破坏具有非对称性,且关键部位是巷道断面与岩层倾斜方向的钝角部位,同时针对性地采用非对称加强支护及围岩控制对策,取得了较好的工程应用效果。

本文在既有学者研究的基础上,依托某在建公路隧道病害情况,通过理论分析、数值计算等对隧道病害产生的原因进行剖析,为该隧道病害处治及后续采取相应的工程措施提供一定参考。

1 工程概况

某隧道位于甘肃省定西市岷县西寨镇冷地村与关上村之间,穿越兴梁山脊状山体,最大埋深299.09 m,属双洞岩质长隧道。隧址区属构造剥蚀中山地貌,地势中间高两端低。

隧址区地层主要由第四系全新统坡积(Q_4^{al})角砾、碎石,第四系上更新统风积黄土(Q_3^{col}),中更新统(Q_2^{al+pl})高阶地冲洪积轻微胶结卵石层以及中三叠统T₂b炭质板岩和砂质板岩组构成,其中K120+670~K120+908洞身段围岩以炭质板岩为主,夹有薄层状板岩,岩质相对软弱,遇水易软化、泥化、易风化,岩体较破碎,围岩自稳能力较差。主要表现为层间挤压、扭曲,以薄厚层—中层状产出,中间夹薄层砂岩,产状34°∠41°。隧道出口坡面整体倾向317°,坡面倾角73°,岩层产状与坡体呈层状反向结构,倾向山体。受构造影响岩体破碎,节理发育,统计体积裂隙16~27条/m³。隧道典型地质横断面如图1所示。

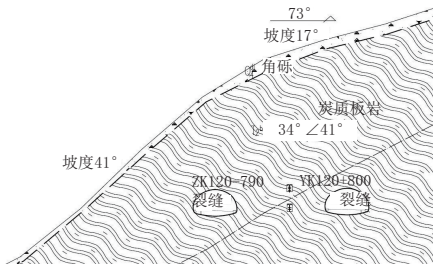


图1 隧道地质横断面图(左侧为左洞)

隧道衬砌结构采用复合式衬砌,初期支护由喷射混凝土、钢筋网、钢拱架构成,二次衬砌采用钢筋混凝土结构,具体衬砌设计支护参数如表1所列。

表1 衬砌设计支护参数表

支护措施	支护参数
超前支护	φ42×4超前小导管
初期支护	φ22水泥药卷锚杆 L=500 cm
	φ42 mm×4 mm注浆锚管 L=300 cm
	φ8钢筋网 20 cm×20 cm(双层)
二次衬砌	I22a工字钢间距 60 cm
	喷射 C25 混凝土厚 28 cm
	模筑 C35 钢筋混凝土 50 cm

2 隧道病害

2.1 仰拱填充裂缝

隧道左线仰拱填充顶面出现裂缝的段落为ZK120+776~ZK120+827,裂缝长度51 m,其平面位置位于路线前进方向左侧,中心水沟位于右侧。隧道右线仰拱填充顶面出现裂缝段落为YK120+790~YK120+816,裂缝长度26 m,其平面位置位于路线前进方向右侧,中心水沟位于左侧,如图2和图3所示。

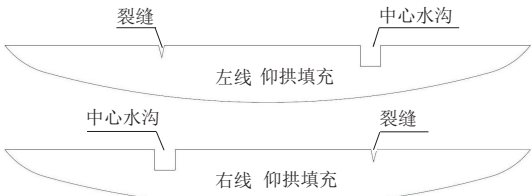


图2 隧道仰拱填充顶面裂缝示意图

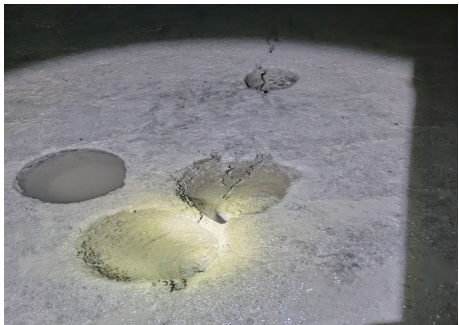


图3 隧道仰拱纵向裂缝现场照片

2.2 二衬裂缝

隧道仰拱填充顶面出现裂缝段落范围内的二次衬砌局部纵向裂缝,左右线裂缝分布段落分别为ZK120+815~ZK120+824(9 m)、YK120+790~YK120+808(18 m)。裂缝均位于路线前进方向的右侧拱腰位置,方向与隧道岩层倾角垂直,如图4、图5所示。

3 原因分析

3.1 衬砌结构受力分析

岩体开挖一个圆形洞室后,岩体的二次应力分

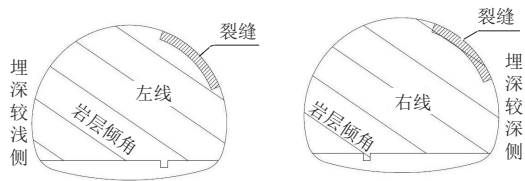


图4 隧道二衬裂缝位置示意图



图5 隧道二衬纵向裂缝现场照片

布状态会出现沿结构面产生剪切破坏的现象,洞室周围的围岩将出现剪裂区,即节理岩体由于开挖产生沿节理剪切滑移破坏的区域。根据李文江^[10]采用弹性力学的分析方法推导的 $\lambda=1$ 时圆形洞室剪裂区半径,可得深埋节理岩体洞周所出现的四个剪裂区分布示意图^[11],具体如图6所示。

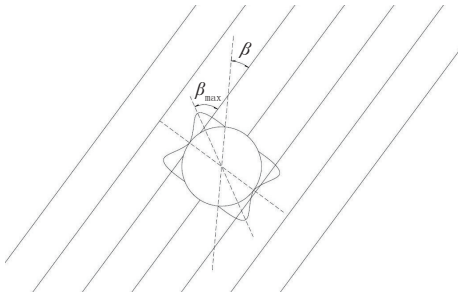


图6 剪裂区分布示意图

由以上分析可知层状围岩下隧道衬砌结构受力特征:近乎垂直岩层方向存在剪裂区,对应隧道衬砌结构部位存在较大的松散荷载,进而对应部位衬砌结构出现最危险断面,一旦内力超过衬砌结构承载能力就会产生病害。

3.2 计算模型及分析

为进一步验证上述对二次衬砌裂缝产生原因的分析,综合考虑隧址区地形和岩层产状,建立二维地层结构有限元分析模型。通过设置岩层间界面单元来模拟岩层产状及层面对隧道开挖支护过程中的影响,其中,围岩及仰拱填充采用平面应变单元,二次衬砌采用梁单元;围岩选用莫尔库伦本构模型,二衬及仰拱填充选用弹性本构模型,相关计算参数如表2所列。

表2 模型计算参数				
参数	围岩	二衬	仰拱填充	岩层面
单元类型	平面应变单元	梁单元	平面应变单元	界面单元
容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	20	22	22	—
弹性模量/GPa	3.0	32.0	22.0	—
法向刚度/($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	—	—	—	2.0
剪切刚度/($\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	—	—	—	1.8
泊松比	0.4	0.25	0.25	—
黏聚力/MPa	100	—	—	100
内摩擦角/($^{\circ}$)	45	—	—	38

考虑在自重应力作用下围岩及衬砌结构的受力和变形,上边界为实际地形横断面; X 方向宽140 m,左右两侧为水平位移约束;底面取距仰拱底为两倍洞径的位置,底边为固定位移约束。本节对不考虑岩层倾角和考虑岩层倾角两种工况下隧道衬砌及仰拱填充的力学响应进行对比分析。

如图7至图9所示,通过对围岩塑性区分布和衬砌结构内力分析可知,层状围岩变形主要受垂直于岩层的法向荷载影响,隧道开挖后右拱腰岩层易向临空面发生弯曲破坏和剥离,荷载及变形作用于隧道衬砌结构后致使左右洞衬砌结构拱顶至右侧拱腰间产生拉应力,当其数值超过混凝土极限抗拉强度后即产生拉裂缝,这一规律也与本隧道二次衬砌结构纵向裂缝的分布相统一。

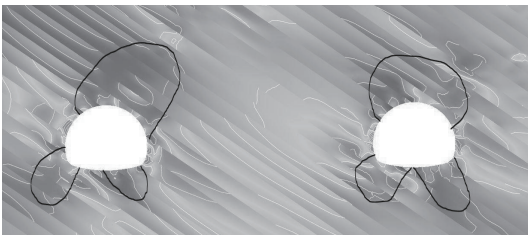


图7 塑性区范围(左侧为左线,右侧为右线)

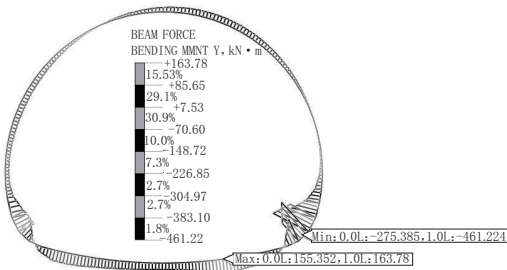


图8 不考虑岩层倾角的弯矩图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

3.3 仰拱填充产生的裂缝分析

仰拱填充采用C15现浇混凝土,中心水沟为预留矩形沟槽,顶面所产生的裂缝均为V字形拉裂缝,

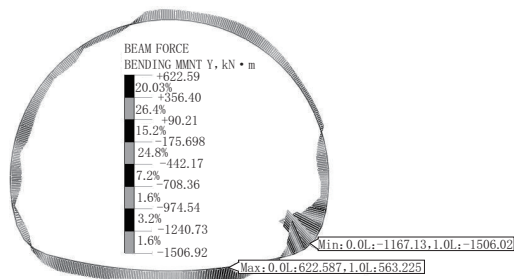


图9 考虑岩层倾角弯矩图(单位:kN·m)

为此,建立仰拱填充有无中心水沟以及考虑岩层倾角情况下的对比模型进行分析^[12]。

(1) 工况1: 仰拱填充未设置中心水沟

左、右洞在仰拱填充顶面均存在较大的拉应力,其中,左洞最大拉应力 $1.49 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,右洞最大拉应力 $1.80 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,且拉应力横向分布范围较广,左右洞并无明显区别,如图10所示。

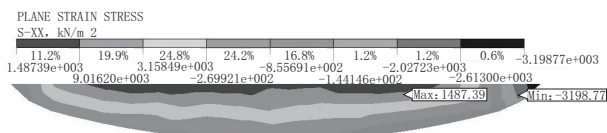


图10 无中心水沟时仰拱填充应力云图(左线)

(2) 工况2: 仰拱填充设置中心水沟

左、右洞中心水沟底部及未设置中心水沟侧仰拱填充顶面均存在较大的拉应力,其中,左洞最大拉应力 $1.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,右洞最大拉应力 $1.61 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,这与该隧道内中心水沟底部及仰拱填充顶面裂缝位置相吻合,如图11所示。分析其原因为中心水沟的设置释放了部分中心水沟周边仰拱填充内力,同时由于形状的改变进而改变了横向内力分布,使得较大的拉应力出现在中心水沟底部以及未设置中心水沟侧仰拱填充顶面。

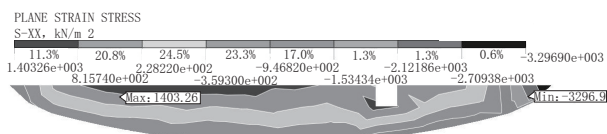


图11 设置中心水沟时仰拱填充应力云图(左线)

(3) 工况3: 仰拱填充设置中心水沟同时考虑岩层倾角

左、右洞最大应力分布范围与工况2(仰拱填充设置中心水沟)基本一致,但左洞最大拉应力 $8.83 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,右洞最大拉应力 $6.59 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$,其数值较未考虑岩层倾角情况下提高了4~5倍,因此仰拱填充发生纵向裂缝的可能性更大,如图12、图13所示。

由上图还可以发现,左洞最大应力分布在未设置中心水沟侧,而右洞最大应力分布在中心水沟底,

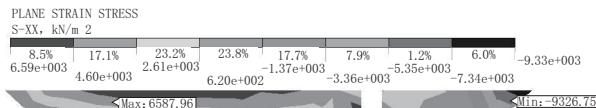


图12 设置中心水沟考虑倾角时仰拱填充应力云图(左线)

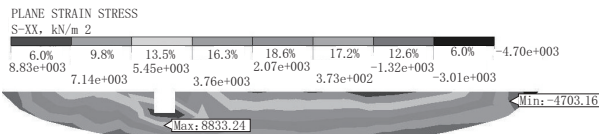


图13 设置中心水沟考虑倾角时仰拱填充应力云图(右线)

但均分布在与岩层倾角大角度相交的拱脚侧,这也与层状节理岩体中仰拱位置出现破坏塑性区的分布特征相近似。

总之,仰拱填充拉裂缝产生的原因归根结底均为仰拱填充横向两侧与结构中部的不均匀沉降造成的“掰裂”^[13],而中心水沟的设置改变了仰拱填充应力分布范围;同时考虑岩层倾角的存在,仰拱出现不均匀沉降,且应力明显增大,仰拱填充顶面与中心水沟底均应出现裂缝,这也与现场出现病害裂缝分布情况相吻合。

4 处治措施

根据上述仰拱填充顶面及二衬产生裂缝的原因并结合现场裂缝分布情况,采取针对性措施^[14]:(1)仰拱底部设置 $\phi 108 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管桩,长度6 m,间距 $150 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$,垂直打入基底;仰拱两侧拱脚位置各设置两根 $\phi 108$ 锁脚,长度为9 m,纵向间距为80 cm,打设角度分别以 55° 、 45° 控制,如图14所示;原设计44 cm厚素混凝土路面下面层及基层调整为钢筋混凝土面板;(2)仰拱及二衬裂缝根据裂缝宽度采用专用裂缝胶灌注封闭或利用环氧树脂砂浆压注填充密实;(3)二衬未施工及尚未开挖段落拱顶至右拱腰范围设置 $\phi 42$ 注浆锚管/ $\phi 22$ 药卷锚杆,长度均为5 m,纵向及环向间距分别为 $160 \text{ cm} \times 160 \text{ cm}$,两侧拱脚采用 $\phi 108$ 锁脚,长度为6 m。

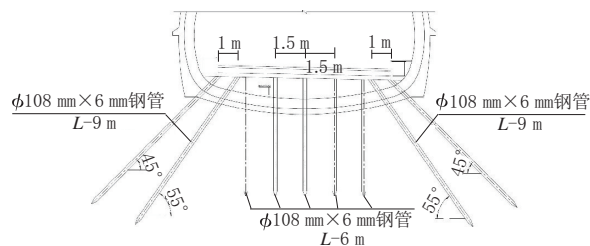


图14 仰拱底及拱脚加强设计图

由于正确认识了隧道裂缝产生的机理并采取了与之相适应的工程对策,纵向裂缝发生段已进行加

固返修,确保了该隧道安全顺利贯通,现已正式投入运营,通车状况良好,隧道路面及衬砌结构未出现裂缝等病害。

5 结 语

(1)仰拱填充两侧的竖向沉降使得填充顶面产生了拉应力区,而开口式中心水沟的设置改变了仰拱填充顶面的拉应力分布特点,使得较大的拉应力分布在中心水沟底部和未设置中心水沟侧的仰拱填充顶面中心位置;倾斜岩层进一步增大了拉应力数值,加剧了裂缝的产生。

(2)当隧道围岩为倾斜岩层时,近乎垂直倾角方向存在剪裂区,对应部位衬砌结构出现最危险断面,易产生病害。

(3)对于倾斜岩层软岩隧道建议结合岩层倾角与隧道之间的关系,采取有效措施控制隧道两侧拱脚竖向沉降,同时有针对性的加强加固围岩措施,提高层状围岩的自稳性。

参考文献:

- [1] 叶飞,何川,夏永旭.公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J].土木工程学报,2010,43(7):97-104.
- [2] 程崇国,郭军.公路隧道衬砌裂缝处治对策[J].公路交通技术,

2017,33(6):95-104.

- [3] 邓祥辉,赵志清,王睿,等.不同倾角和层厚的层状围岩隧道稳定性数值分析[J].西安工业大学学报,2018,38(3):232-238.
- [4] 邓彬.地质顺层偏压隧道偏压作用的数值分析[D].成都:西南交通大学,2004.
- [5] 刘金松.倾斜岩层中隧道衬砌裂缝产生机理及其稳定性研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [6] 孟陆波,黄意霖,李天斌,等.高地应力层状软岩隧道非对称挤压大变形分级修正方法研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):147-156.
- [7] 孙晓明,张国锋,蔡峰,等.深部倾斜岩层巷道非对称变形机制及控制对策[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1138-1143.
- [8] 张明建,郜进海,魏世义,等.倾斜岩层平巷围岩破坏特征的相似模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,5(增刊1):3259-3264.
- [9] 杨帆,陈卫忠,郑朋强,等.急倾斜软硬互层巷道变形破坏机制及支护技术研究[J].岩土力学,2014,35(8):2367-2375.
- [10] 李文江.隧道力学[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [11] 胡炜,喻渝,谭信荣,等.顺层偏压隧道破坏特征及支护措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊1):450-510.
- [12] 陈星州.仰拱曲率对浅埋大断面隧道衬砌结构承载力的影响研究[J].城市道桥与防洪,2023,9(293):282-284.
- [13] 张建,梁庆国,王永刚,等.黄土隧道底鼓机理分析与防治技术[J].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(1):84-90.
- [14] 刘泾堂.浅埋偏压小静距隧道施工病害处治技术[J].城市道桥与防洪,2018,2(2):139-142.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

