

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.02.060

# 膨胀性软岩隧道致灾机制研究与应用

王康<sup>1,2</sup>,高永涛<sup>2</sup>,赵光<sup>1</sup>

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏南京 210019; 2.北京科技大学,北京市 100083)

**摘要:**隧道建设的规模和数量迅速发展,相关理论研究却相对不足,随着隧道越来越多地穿越诸如软弱围岩、溶洞等复杂、恶劣地质区域,对施工技术和理论研究的要求也更高,如何做到规避灾害,安全施工是大家一直关注的问题。以重庆市某公路隧道为依托,对穿越膨胀性软岩段隧道,提出不良地质构造与围岩条件、水的因素、不规则地应力以及工程因素等导致隧道灾害的因素,不同因素相互关联、相互影响,根据分析结果采取相应的防治方案来规避灾害。利用 Poyting-Thomson 模型计算隧道围岩变形,与现场监控量测数据相结合,对隧道膨胀性软岩段的围岩变形做出预测,得出最佳二次衬砌支护时间。同时从初支二衬间的应力角度对膨胀性软岩进行了持续监测,表明了膨胀性软岩隧道段防治方案达到了预期目标。从致灾机制来分析隧道建设,可以更好地为工程决策服务。

**关键词:**膨胀性软岩;致灾因素;防治方案;初支二衬应力

**中图分类号:** U455

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)02-0276-06

## 0 引言

近些年我国隧道建设大规模发展,据统计,2021年全国公路隧道为23 268处、2 469.89万延米,其中2021年特长隧道1 599处、717.08万延米,长隧道6 211处、1 084.43万延米<sup>[1]</sup>。但是我国地形复杂,地质多变,隧道建设面临着越来越多的挑战,其中软弱围岩的设计与施工难题一直困扰着广大隧道建设者。软弱围岩自稳性差、变形大并且持续时间长,造成的灾害问题也日益突出,主要表现为:支护开裂、钢拱架扭曲、地板隆起,甚至局部地区发生坍塌或者二次衬砌开裂现象。这些不仅严重影响施工的安全与成本,也制约着工程的工期与质量。隧道建设日益增多,但是关于软弱围岩的研究却进展缓慢,对软弱围岩的变形特征、变形机理、发展演化规律等认识还处在探索阶段,没有系统性的结论,对于复杂多变的地质情况适用性不强。

国内外对软岩进行了多年的研究,但由于其复杂性,对软岩并没有统一的定义。1981年在东京召开的“国际软岩学术讨论会”规定“软弱、破碎和风化岩石”为软岩。国际岩石力学学会(ISRM)定义软岩为单轴抗压强度在0.5~25 MPa的岩石。我国1984年在昆明召开的煤矿矿山压力名词讨论会上

提出的定义为,软岩是指强度低、空隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层。何满潮等<sup>[2]</sup>将软岩分成地质软岩和工程软岩,分别予以定义,上述软岩为地质软岩,而工程软岩指在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体,开挖引起的围岩松动圈厚度大于1.5 m,常规支护不能有效控制围岩变形,需要多次支护,甚至需要通过对已支护区段的扩挖来满足建筑限界要求的围岩。他将软岩分为四类,即膨胀性软岩、高应力软岩、节理化软岩和复合型软岩,膨胀性软岩在力的作用下或在水的作用下体积增大。

目前隧道施工主要采用新奥法,充分利用围岩的自承能力和开挖的空间约束作用,采用锚杆和喷射混凝土及时对围岩进行加固,约束围岩的松弛和变形,并通过施工监控量测来指导隧道设计施工。由于软岩的流变作用明显,特别是对于膨胀性软岩,围岩的变形时间很长,即使初期支护后围岩变形趋向稳定,在后期也可能产生较大变形,同时膨胀性软岩还受水的影响,岩石性质发生变化,因此需要对软岩段进行持续监测。目前初支二衬间应力监测常常作为监控量测选测项目,很少运用到软岩隧道的致灾机制研究中。本文结合已建成的重庆某公路隧道对膨胀性软岩隧道的主要致灾因素及内在联系进行研究。隧道施工开挖后及时开展监控量测,利用考虑围岩黏弹性的 Poyting-Thomson 模型计算隧道围岩变形,将理论数

收稿日期:2023-02-02

作者简介:王康(1992—),男,硕士,工程师,从事地下空间与隧道设计工作。

据与实际相结合,分析膨胀性软岩隧道变形特征,计算最佳二衬支护时间。并在二次衬砌浇筑前布设初支二衬应力监测点,进行应力监测,对膨胀性软岩隧道的致灾机制及相应防治措施进行分析验证。

## 1 工程概况

该隧道位于重庆市梁平县。隧道设计全长5 519.15 m(折算为左右洞平均值),为左右线分离式特长隧道,双向四车道,是《重庆市高速公路网规划》(2003—2020年)中需要修建的一条隧道,该隧道是重庆梁平至忠县高速公路项目的控制性工程。

根据相关地勘资料,该隧道要穿越320 m左右的石膏岩地层,主要分布于明月山背斜轴部的三叠系下统嘉陵江组四段的地层中。隧道施工至出口左洞ZK14+995.7,出口右洞K14+994,掌子面较初始地勘和设计资料提前出露石膏地层。石膏岩作为膨胀性软弱围岩的一种,兼具软岩的基本特性,还有其特有的一些性质,这些性质会对隧道施工及后期运营产生不利影响。经试验,隧道石膏对混凝土具有强腐蚀(对应的腐蚀等级为D级),对钢筋混凝土结构中的钢筋具有微腐蚀性。熟石膏的水化重结晶过程会使其体积增大,具有中~强膨胀性,对隧道的衬砌具有较大的危害。该段较设计资料提前进入石膏岩段,需及时变更该段施工方案,避免支护方案不匹配造成严重的地质灾害和安全事故。

## 2 致灾因素分析

膨胀性软岩隧道地质条件复杂,易受外界扰动,从地质因素和工程因素来分析致灾因素。

### 2.1 隧道地层岩性与构造

隧道石膏岩段穿越三叠系下统嘉陵江组四段(T1j4)地层,为石膏岩,巨晶结构,中厚层状构造,石膏属极软岩,围岩为碎裂结构,节理裂隙发育,岩体整体较破碎。石膏岩为膨胀性软岩,围岩中灰白色石膏岩的含量决定着围岩的膨胀程度,含量越高,膨胀量越大。膨胀性软岩具有流变性和易扰动性,对爆破震动、开挖扰动,以及邻近隧道的施工极为敏感。而围岩为碎裂结构,节理裂隙发育,更加剧了围岩的变形。这都要求严格控制开挖进尺和相邻掌子面间距。

针对这一段,采用地质雷达进行超前地质预报,并加大超前钻杆探测频率,对掌子面前方围岩做出准确判断,指导施工。如图1所示,掌子面前方

围岩性质单一,即主要为石膏岩,局部有节理。

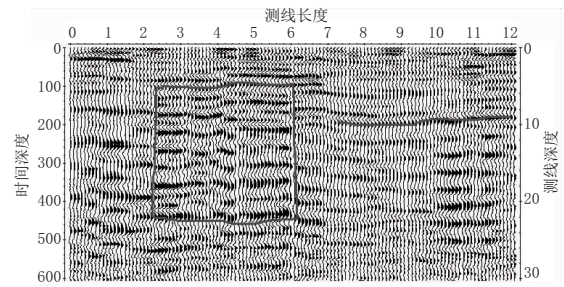


图1 地质雷达超前预报波形图

### 2.2 水的因素

礼让隧道的隧址区属于亚热带气候区,在夏季的前期降水较多,秋季雨期较长,冬季的雾气较重,加上破碎岩隙之间能较好地形成贮水条件,因此该地区的水类型为富水区域。槽谷中沿槽谷方向发育延伸的盐井河,为季节性溪流,盐井河水流入天生桥汇入盐井口水库,河流全长约15 km,最大流量可达2.50~5.50 m<sup>3</sup>/s左右。

膨胀性软岩在水的作用下会产生膨胀性、软化性和腐蚀性。膨胀性软岩尤其是石膏岩具有明显的亲水性,遇水产生膨胀变形,导致隧道衬砌结构承担额外的膨胀压力,甚至超出支护结构的承载能力,导致混凝土结构局部应力集中,出现初支裂缝、钢拱架扭曲等危险工况。

同时膨胀性软岩在水的影响下会产生软化现象,含水率的变化对石膏岩的单轴抗压强度和弹性模量的影响十分明显。祝艳波等<sup>[3]</sup>利用三轴伺服机对不同含水率下的石膏岩质进行单轴压缩试验,表明随着含水率的增高,抗压强度、弹性模量、变形模量都呈下降趋势,并与含水量存在一定的函数关系。Isik Yilmaz等<sup>[4-5]</sup>发现在饱和状态下,石膏岩的单轴抗压强度是干燥状态下的0.349 2倍,弹性模量为干燥状态下的0.536 3倍。目前大多数隧道采用新奥法开挖,利用围岩的自稳性来承担围岩部分变形,膨胀性软岩遇水软化,使得围岩的自稳性变差。隧道开挖应力重新分布时,围岩可能没有足够的强度支撑周围岩体对隧道的挤压,直接导致隧道的坍塌。

该隧道石膏岩成分具有中~强腐蚀性,对混凝土及其中的钢筋都具有腐蚀性,并且这个腐蚀过程是强弱交替,反复作用,导致支护的混凝土强度逐渐降低,最终失去承载能力。

### 2.3 地应力

软岩隧道的失稳是由于隧道开挖,引起围岩应力重新分布超过围岩强度造成的。围岩是否会失稳



取决于初始应力的方向、大小以及构造运动产生的应力。软岩中围岩应力重新分布会产生较大的塑性区和松动区,膨胀性软岩具有强烈的各向异性,导致在隧道周边不同部位产生不同程度的变形,造成支护结构受力不均,产生集中荷载和较大弯矩,使隧道产生局部的支护变形甚至坍塌。

## 2.4 工程因素

工程因素包括设计和施工两个方面。在隧道施工中,工程前期的地质勘查是在大范围内进行的,勘察的精确度不足,导致初始设计不能完全符合现场的实际需求。隧道较设计资料提前 20 m 进入石膏岩段,原设计段为 IV 级围岩,以灰岩为主。若按照设计资料进行施工,采用原设计开挖方法、支护类型和方法等,将埋下严重的安全隐患,甚至在施工时就产生安全问题,诸如隧道坍塌、支护开裂、底部隆起等。

隧道施工主要包括开挖方法和支护类型。新奥法施工导致软岩松动变形大,速度快,支护难度大,因此常采用多分部、小断面的开挖方法,诸如台阶法、预留核心土法、CD 法和 CRD 法等。分部开挖可以使得开挖面尽早成环,形成封闭的支护圈,控制隧道的变形量。但是多分部开挖会造成围岩的多次扰动,造成围岩松动区域扩大,并且增加了施工组织的难度。因此,需要根据隧道围岩性质和地层结构来决定开挖方法,才能更好地保证施工安全。

同时软岩的性质决定着需要超前支护,如超前锚杆和超前注浆,用来提高掌子面及周边围岩的稳定性。而隧道开挖后的支护类型和时机,也对隧道的稳定性和施工的安全性起到关键作用。如果支护体系与围岩变形特征不适应,将会造成支护结构的破坏,围岩的变形进一步扩大。隧道开挖后,围岩产生变形,承载能力也不断增大,当围岩变形达到最佳支护时间时,弹性区和塑性硬化区变形稳定,可以自稳,而塑性软化区和塑性流动区是不稳定区,必须施加一个支护力才能保持稳定。根据围岩松动圈围岩支护理论<sup>[6]</sup>,支护刚度大或者架设太早,围岩将承受较大的变形压力;支护太迟,围岩将松动破坏,产生较大的松动压力。

由以上分析可知,工程因素是膨胀性软岩隧道灾害的直接诱发原因,水的因素是决定膨胀性软岩隧道灾害程度的关键因素。施工开挖时,在各致灾因素相互影响下,围岩原有的平衡被打破。开挖方法决定着对原岩的干扰程度,支护方法和时机决定着隧道成洞后的稳定性和后期运营时的安全性。膨胀性

软岩自身强度低,由于地应力,隧道开挖将产生较大塑性区和松动区。在水的影响下,更加剧了围岩的软弱性,同时导致软岩膨胀变形,进一步加大软岩失稳破坏的可能性。石膏岩特有的腐蚀性还会对隧道的钢筋混凝土产生破坏,无法达到预期的支护强度产生灾害。因此,隧道进入特殊地段,需要加强对不良地质岩性和结构的勘察分析,对原设计施工方案进行优化,必要时需要进行专家讨论,建立专项处置方案。各致灾因子关系如图 2 所示。

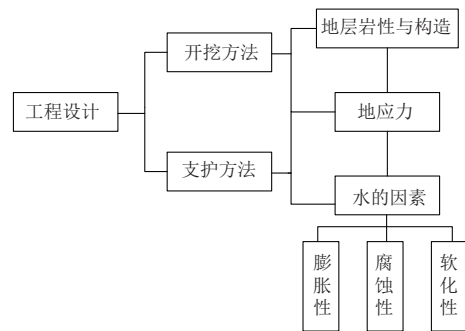


图 2 致灾因素关系

## 3 膨胀性软岩隧道特殊处治与评价

### 3.1 隧道设计处置方案

针对隧道施工至出口左洞 ZK14+995.7,出口右洞 K14+994,提前出露石膏岩,与设计方案有一定误差。经专家论证,石膏围岩段设计施工以“加固围岩,改善洞形,先柔后刚,先放后抗,变形留足,底部加强”为原则。现场在超前地质预报和超前钻杆综合探测的基础上,采取如下措施,并根据监控量测,严格遵循“动态设计、信息化施工”原则。

#### (1) 加强隧道防排水

水是膨胀性软岩隧道产生灾害的主要根源,围岩在水的作用下软化和膨胀,导致强度降低、变形增大,并产生了额外的膨胀压力,使围岩压力超出了隧道支护结构承载能力,石膏岩特有的腐蚀性会降低衬砌结构的支护强度。因此施工中须防止水的浸湿和浸泡基底,以控制边墙变形和底鼓现象。若施工过程中出现严重底鼓现象,可采用长锚杆加固底部围岩,尤其是拱脚位置,松散围岩可注浆加固。此外,可根据现场情况,在仰拱底部铺设粉煤灰垫层,能有效抑制围岩吸水后膨胀。施工中切实做好隧道防水和排水工作,特别是要防止施工用水和水汽进入岩体,在围岩水源处增设渗水盲沟或渗透注浆、帷幕注浆止水。

对初期支护,调整混凝土配合比,掺加外加剂,提高其抗渗能力,并对混凝土脱空、空洞进行注浆处

理,起拱线以下采取Φ42小导管径向注浆堵水,间距1.0 m(环)×1.2 m(纵)梅花形布置,小导管壁厚3.5 m,长5.0 m,注浆压力0.5~1 MPa;在初期支护与二次衬砌间铺设土工布并加设EVA防水板;对二次衬砌,加密横向排水管间距,对二衬施工缝设置背贴式橡胶止水带,注浆管膨胀止水条,从环向施工缝引出注浆管。

(2)完善隧道支护衬砌结构

隧道支护衬砌结构决定着开挖施工后隧道的稳定性,以及后期运营的安全性。根据石膏岩特殊的地质条件,增强隧道的支护结构强度,完善支护衬砌结构。具体措施为:①加强超前支护,采取Φ12双排小导管进行超前支护;②初期支护采用20b工字钢全周封闭支护,起拱线以上布置1 m长Φ25中空注浆锚杆。施工时根据现场监测情况,若变形量较大,引起初喷混凝土开裂,则需岩喷层每隔2~3 m布置一条10~15 cm宽的纵向变形缝。③加强二衬,采取70 cm厚钢筋混凝土结构,采用先柔后刚、先让后顶、分层支护的方法,通过现场监控量测和理论计算来确定二次衬砌施作时间。

(3)合理控制两隧道掌子面间距

该隧道为小净距隧道,两隧道工作面应该错开施工。膨胀性软岩易受扰动,若两隧道掌子面间距过小,隧道的爆破开挖将会对相邻隧道工作面造成破坏。因此,如果两隧道掌子面间距过大,后行隧道的爆破施工会对先行隧道的二衬造成破坏损伤,所以需要合理控制两隧道掌子面间距。而膨胀性软岩隧道的二次衬砌也需要按照一定的时机进行支护,按照规定<sup>[7]</sup>,软弱围岩及不良地质隧道的二次衬砌应及时施作,二次衬距砌掌子面的距离V级及以上围岩不得大于70 m,同时结合计算,最佳支护时间在21 d左右,每天进尺在2 m左右,掌子面距二衬间距在42 m左右。

根据规定,两隧道工作应错开施工,先行洞与后行洞掌子面错开距离应大于2倍隧道开挖宽度,隧道石膏岩段隧道开挖宽度为10.66 m,即错开距离应大于21.32 m。根据袁飞等<sup>[8]</sup>通过对软岩隧道的数值分析,右(左)洞开挖面和左(右)洞尚未达到强度要求的二衬之间应保证留有至少10 m的间距,左右洞掌子面之间应保持至少25 m的间距,以减轻右洞施工对左洞的扰动。所以掌子面间距可确定为25~32 m。

3.2 处置效果评价

该隧道石膏岩段属于V级围岩,根据规范每隔

10 m布置一个监测断面,按照表1进行监测。

表1 拱顶下沉与周边位移量测频率

量测频率	位移速度/(mm·d <sup>-1</sup> )	量测断面到开挖面距离
2次/d	>10	<0.5B
1次/d	5~10	0.5B~2B
1次/2d	1~5	2B~5B
1次/7d	<1.0	>5B

注:B表示隧道开挖宽度。

若围岩变形不充分,后期衬砌可能会被压坏;施作过迟,则变形过大,围岩松弛造成坍塌。因此,根据隧道的变形量来确定二衬的最佳支护时间,根据李广瑞等<sup>[9]</sup>考虑掌子面开挖前方拱顶的前期下沉值,以及围岩的弹塑性和流变性,总收敛值计算公式为:

$$\delta_{all}(x,t) = 1.67 \delta_{xx} \times \left[ 1 - \left( \frac{X}{x+X} \right)^2 \right] \times \left\{ 1 + m \left[ 1 - \left( \frac{T}{t+T} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\delta_{all}(x,t)$ 为总收敛值; $\delta_{xx}$ 为隧道变形的瞬时极大值; $x$ 为掌子面距离研究断面的距离; $X$ 为掌子面的影响距离; $T$ 为围岩流变特性参数; $t$ 为掌子面开挖时间; $m,n$ 为常数。

现场测得数据中,已知 $\delta(x,t)$ 、 $x$ 、 $t$ ,使用MATLAB对实测数据进行最小二乘拟合,求出其他未知数,从而求解出当 $x$ 和 $t$ 无穷大时的拱顶下沉值,即隧道的最终收敛值。通过对多组拱顶下沉监测数据的拟合,得出拟合参数见表2。将拟合结果代入公式,求得 $\delta_{all}(x,t)=47.36$ 。根据规范,在总变形量达到80%~90%,即总变形量达到37.88~42.64 mm时为隧道二次衬砌的最佳施工时间。而拱顶下沉的超前沉降部分占拱顶沉降总量的40%左右,此时对应的监测变形量为22.68~25.53 mm。

表2 公式中参数拟合结果

	$\delta_{xx}/\text{mm}$	$X/\text{m}$	$T/\text{d}$	$m$	$n$
拟合参数	2.17	46.28	92.51	12.07	19.72

对监测数据进行处理,通过收敛变化曲线和速率变化曲线来分析隧道的变形趋势及稳定性。从图3和图4发现,软岩隧道不管是拱顶还是周边的变形量,在初始阶段迅速增大,后趋于平缓,在28 d左右基本达到稳定,变形速率稍有波动,但是整体趋势不断减小,最后趋于0.1 mm/d,表明围岩基本达到稳定。根据规范,在位移总量达到80%~90%、位移速率明显收敛时构筑二衬。图中显示位移总量为29 mm左右,因此变形量在23.2~26.1 mm,也与理论计算所得的变形量相符,对应的时间为17~21 d。



同时围岩的位移速率在 0.5 mm/d, 并不断减小趋于稳定,符合构筑二衬的规范要求。鉴于该段为石膏软弱围岩,围岩强度较弱,易受扰动,建议采用二衬施工期的大值,即 21 d 开始构筑二次衬砌。

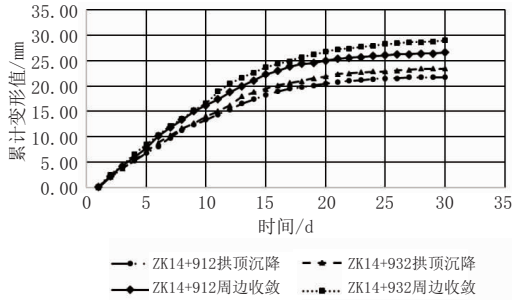


图3 围岩累计变形值

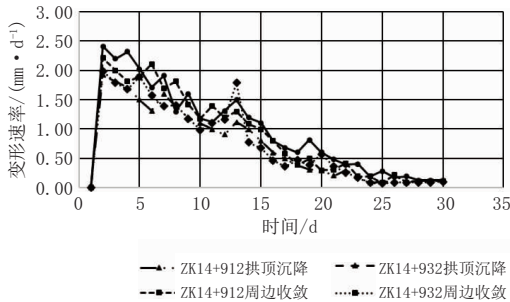


图4 变形速率

石膏岩属于膨胀性软岩,围岩的变形具有流变性,变形时间长,同时受水的影响较大。为了进一步验证隧道石膏岩段的处治效果,对围岩变形需要进行持续监测。二衬施作以后将无法直接监测隧道的变形量,二衬作为膨胀性软岩隧道承载结构的一部分,也作为安全储备,若出现开裂等现象,表明隧道的衬砌结构已经遭到较严重损坏。因此可以在二衬施作前,在隧道特殊段布设初支二衬应力监测点,通过应力监测来判断分析围岩的变形、支护衬砌的强度和稳定性。

该隧道在石膏岩段左右洞每隔 10 m 布置一个监测断面,每断面 4 个监测点,应变计传感器埋设在二次衬砌混凝土内、外侧,在混凝土浇筑前,将应变计固定在待测位置的钢筋外表面上,沿着隧道切线方向布置,具体布置如图 5 所示。为了使分析结果更准确,同时便于更好地研究石膏岩的性质,在数据稳定后仍采取每天一次的监测频率。

该隧道对石膏岩段的初支二衬间应力进行了持续的监测,除部分应力计损坏,其余监测数据良好。图 6~ 图 9 是隧道初始进入石膏岩段及中期段应力监测图,从监测点数据分析图可以清楚地表现出隧道从二衬浇筑完毕、二衬应力重分布达到稳定的初支二衬间应力的发展情况。初支二衬间应力先增大

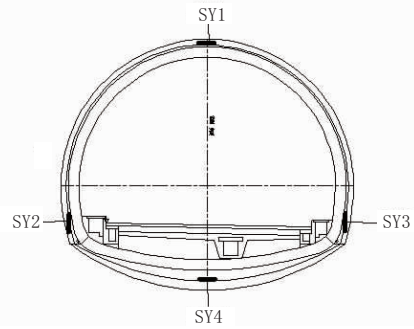


图5 初支二衬间应力监测点布设横断面示意图

后减小然后缓慢增大并逐渐趋于稳定。二衬浇筑完成后,混凝土的强度和刚度迅速增加,初支二衬间应力不断增大。衬砌台车对二衬提供了一定的支反力,拆模时应力达到峰值;随着支反力的释放,应力逐渐减小。之后,由于膨胀性软岩的流变性和衬砌刚度的缓慢增大,应力也缓慢增大,最后围岩与衬砌整体达到平衡稳定状态,数据保持平稳。若围岩遇水产生较大变形或者围岩软化强度变低,都会造成初支二衬间应力的明显变化,从而可以判断出围岩的变形和支护衬砌的强度和稳定性。

不同断面的不同监测位置的数据不同,但是整体的变化趋势较为一致。初支二衬间应力迅速增大至 0.2~0.4 MPa 之间,之后不断减小至 0.05~0.3 MPa 左右,然后缓慢增长最终趋于平稳。从图 6 和图 7 清楚反映出在 20 d 前后压力已基本稳定,图 8 和图 9 反映出压力在达到稳定后又有上下波动,尤其是对于右腰和拱顶的位置。结合现场实际,隧道在 ZK14+660 时开始施工加宽带,隧道的爆破用药量稍有增大及装载机等机械运行频率加大,从而引起初支二衬间应力的小范围波动。总体监测数据表明,二次衬砌承载了部分压力,膨胀性软岩易受扰动。同时也表明,隧道在石膏岩段的专项处治方案达到了预期目标,控制了围岩的变形量,实现了防水排水。

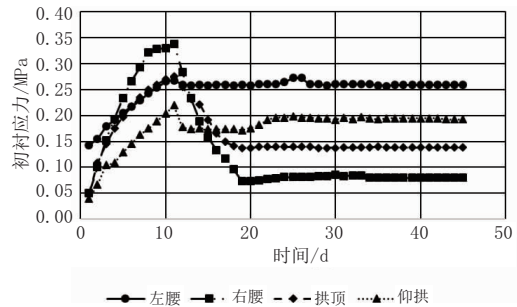


图6 ZK14+983 断面初支二衬间应力

## 4 结论

(1)不良地质构造与围岩条件、水的因素、不规则地应力和工程因素是导致隧道发生灾害的关键因

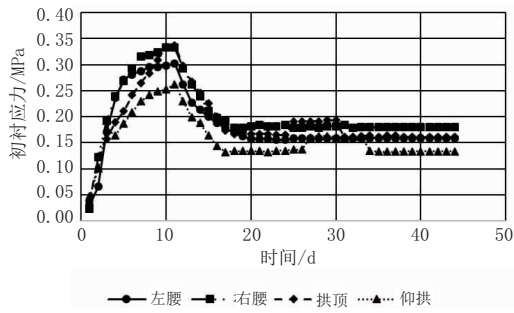


图7 ZK14+953断面初支二衬间应力

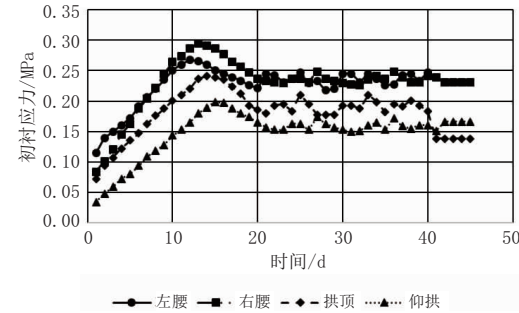


图8 ZK14+783断面初支二衬间应力

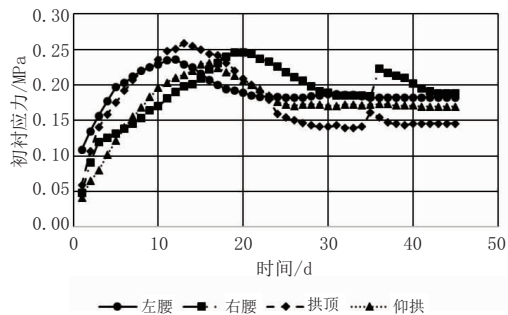


图9 ZK14+753断面初支二衬间应力

素,各个因素之间相互关联、相互影响,工程因素是隧道发生灾害的直接诱因。工程因素受地质因素控制,差的工程因素会加剧地质因素恶化,导致隧道灾害;良好的工程因素会制约地质因素,达到安全施工与运营。

(2)小净距隧道穿越膨胀性软岩隧道时,掌子面纵向间距受每天进尺与最佳二衬支护时间影响,控制在25~32 m时,既可以保证隧道的支护强度,也不会影响后行隧道支护结构的稳定性。

(3)通过对隧道监控量测,包括周边位移、拱顶下沉的总变形量和变形速率,并结合相关理论计算公式,得出最佳二衬支护时机在掌子面开挖17~21 d,膨胀性软岩强度较低,易受扰动,取施工大值21 d,可以控制围岩变形,并保证隧道支护有足够的强度。

(4)膨胀性软岩的变形时间长,受水影响大,需要对隧道变形进行持续监测。初支二衬间的应力监测可以解决二衬施作后无法直接监测隧道变形的难题,反映了膨胀性软岩易受扰动,也可以验证隧道施工与支护方案的效果。通过各种现场的监控量测数据,为进一步研究膨胀性软岩隧道提供了宝贵资料,也证明了不同致灾因子的相互关联、相互影响。将现场实际与理论相结合,采取合理的设计与施工方法,可以有效控制隧道灾害的发生,最终达到安全施工与运营。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报[Z].北京:交通运输部综合规划司,2022.

[2] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002.

[3] 祝艳波,吴银亮,余宏明.隧道石膏质围岩强度特性试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(9):53-58.

[4] YILMAZ I. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 342-347.

[5] YILMAZ I, YUKSEK A G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 803-810.

[6] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994(1):21-32.

[7] 公路隧道施工技术规范[M].北京:人民交通出版社,2009.

[8] 袁飞,刘新荣,钟祖良.偏压黄土连拱隧道掌子面纵向间距优化研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(2):257-262.

[9] 李广瑞,朱自强,鲁光银.浅埋软岩隧道拱顶下沉预测及二衬合理支护时机[J].公路工程,2013,38(5):44-46.

# 《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)