

近平行陡倾薄层状炭质板岩特征及变形规律研究

孙慕楠

(中国水利水电第七工程局有限公司,四川成都 610213)

摘要:随着国内铁路隧道建设的大力发展,软岩大变形隧道建设成为阻碍我国铁路隧道建设发展的重大难题,而近平行陡倾薄层状炭质板岩隧道作为软岩隧道中的典型,其围岩极易发生大变形灾害。通过对某在建铁路隧道薄层状炭质板岩特征及隧道变形规律进行分析,得出薄层状炭质板岩自身强度低,且其含大量黏土矿物遇水极易软化,层理间存在镜面现象,受地应力方向、层理结构和洞轴线不利组合影响极易发生岩层开裂现象导致近平行陡倾薄层状软岩隧道极易在隧道拱腰至拱脚边墙处发生大变形灾害。阐述了对近平行陡倾薄层状炭质板岩特征及变形规律进行的研究。

关键词:陡倾围岩;近平行;薄层状围岩;变形监测

中图分类号:[U25];U215;U212

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)05-0061-05

Study on the Characteristics and Deformation Law of Subparallel Steeply Dipping Thin-bedded Carbonaceous Slate

SUN Munan

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: With the vigorous development of domestic railway tunnel construction, soft rock large deformation tunnel construction has become a major problem hindering the development of railway tunnel construction in China, the subparallel steeply inclined thin-bedded carbonaceous slate tunnel as a typical soft rock tunnel, of which the surrounding rock is prone to large deformation disasters. Through the analysis of the characteristics of thin-bedded carbonaceous slate and tunnel deformation law of a railway tunnel under construction, it is concluded that the thin-bedded carbonaceous slate has low strength, and contains a large amount of clay minerals that are easy to soften when exposed to water. There is a mirror phenomenon between the layers, and due to the unfavorable combination of direction of ground stress, the bedding structure and the tunnel axis, rock layer cracking is very easy to occur, resulting that the sub-parallel steeply inclined thin-layered soft rock tunnel is easy to have side walls from the tunnel arch waist to the arch toe. This paper describes the research on the characteristics and deformation rules of subparallel steeply dipping thin-bedded carbonaceous slate.

Key words: Steeply inclined surrounding rock; Subparallel; Thin-bedded surrounding rock; Deformation monitoring

1 概述

近年来,随着国内基础设施建设的大力发展,铁路隧道工程建设逐步向偏远山区、地质构造复杂区域发展,大量的隧道需要穿越软弱围岩地层,软岩大变形隧道已逐渐成为我国铁路隧道建设中一种常见隧道工程类型^[1]。近平行陡倾薄层状软岩隧道是软岩隧道中的一种特殊类型,系指在软岩地质条件下隧道穿越的岩层陡倾、与隧道轴线近乎平行和相对较薄的厚度^[2]。这种类型的软岩隧道由于其具有地质构造和岩体性质的复杂性,存在岩层薄且破碎、遇水易软化等问题,施工过

程中通常会发生掌子面滑塌、隧道变形量过大且难以收敛、初支二衬开裂、拱架扭曲等各类灾害,进而对隧道的设计、施工和维护提出了巨大挑战。笔者依托国内某在建铁路隧道建设对近平行陡倾薄层状软岩隧道开展了围岩强度特征、收敛变形特征与控制措施研究,所取得的研究成果对近平行陡倾薄层状软岩隧道大变形规律认识、现场施工组织管理、围岩控制具有一定的借鉴意义。

2 薄层状软岩的特性

2.1 薄层状软岩成分分析

技术人员对该隧道现场掌子面薄层状炭质板岩进行了取样,开展了不同浸泡时间试验,其浸泡

收稿日期:2023-05-10

时间分别为1、3、5、7 d。分别对原状试样和浸泡后的试样进行了X-射线衍射全岩分析,用以测试炭质板岩的成分和含量以及浸泡时间对炭质板岩成分和含量的影响。炭质板岩X-射线衍射全岩分析结果见图1。

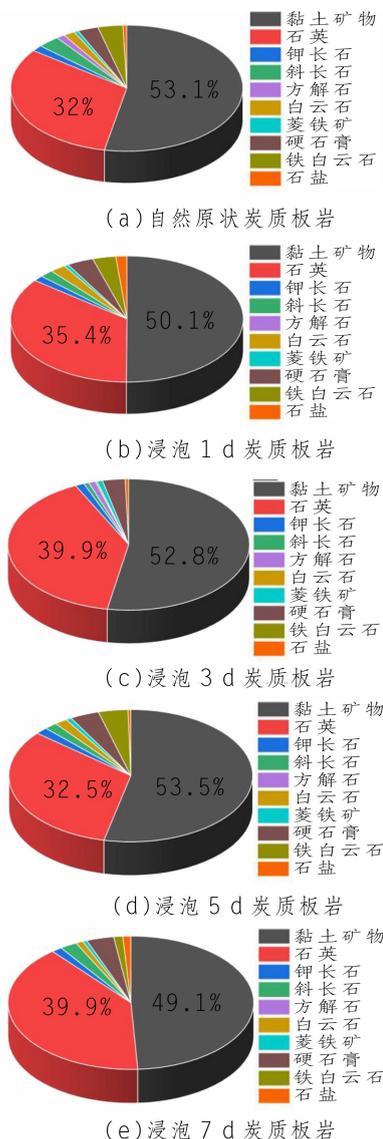


图1 炭质板岩X-射线衍射全岩分析结果示意图

试验结果表明:薄层状炭质板岩主要由黏土矿物和石英组成,伴有少量的钾长石、斜长石、方解石、白云石、菱铁矿、硬石膏、铁白云石和石盐等矿物,其中黏土矿物的含量占比达到50%,其对炭质板岩的宏观性质起到了重要的作用。首先,黏土矿物这种硅酸盐矿物在微观层面上的定向排列形成了宏观层面上的层理;其次,黏土矿物对矿物颗粒和层面之间的胶结也起到了很大的作用。

黏土矿物对水具有很强的亲近性,大部分黏土矿物具有吸水膨胀性,这是由于水进入到黏土矿物这种层状硅酸盐矿物中能够引起其晶格膨胀,进而影响到炭质板岩的强度。

2.2 薄层状软岩的强度

由于该隧道所处围岩强度低且较为破碎,导致无法在现场取样进行室内试验。因此,选择在开挖现场开展岩石点荷载试验进行现场围岩强度测试。项目部针对现场三个里程的掌子面围岩开展了共40组点荷载强度测试试验并将其换算成岩石单轴抗压强度。炭质板岩单轴抗压强度曲线见图2。

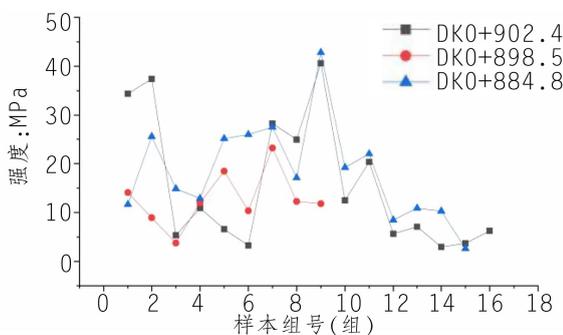


图2 炭质板岩单轴抗压强度曲线图

三个掌子面围岩的单轴抗压强度均为垂直岩层方向加载获得,三个掌子面围岩的平均单轴抗压强度分别为15.63 MPa、12.77 MPa、18.47 MPa,围岩强度较低且遇水极易软化,属于典型的薄层状软弱围岩。同时,从点荷载试验结果可以看出:各掌子面围岩强度存在较大的起伏,说明掌子面围岩强度存在明显的不均匀性,且在现场掌子面常见岩层褶皱、扭曲等现象,其将导致掌子面发生局部滑塌。此外,在点荷载试验期间,发现炭质板岩层间存在镜面现象,从而严重降低了其层间的粘结性,易发生岩层开裂现象。由于现场围岩走向为近平行陡倾条件,导致隧道开挖后边墙混凝土开裂现象严重。

3 隧道变形的监测

笔者选择了4段具有代表性的隧道变形段进行变形规律的研究,各变形段的支护参数见表1。

(1)DK1+020~0+915变形段。变形监测断面为DK1+005,其收敛变形曲线见图3,此时二衬已施作,变形已稳定。其中SL01~SL02累计变形量为193.1 mm,SL03~SL04累计变形量为382.1 mm,SL05~SL06累计变形量为207.6 mm;

表 1 隧道各变形段支护参数设计表

项目	洞 段			
	DK1+020~DK0+915	DK0+915~DK0+895	DK0+895~DK0+875	DK0+875~DK0+855
变形分级	一级软岩大变形		二级软岩大变形	
支护参数	I22b 工字钢×0.6 m 拱墙锚杆 1.2 m× 0.6 m, 长度为 5.0 m	WH175 拱架×0.6 m, 拱部 Φ25 锚杆长 4.0 m, 边墙 Φ25 锚杆长 4.0 m+D32 自进式 锚杆长 8.0 m, 1.2 m(环向) ×0.8 m(纵向)、边墙 1.2 m ×0.6 m	WH175 拱架×0.8 m, 拱部 Φ25 锚杆 1.2 m(环向)×0.8 m(纵向), 单根长 4.0 m; 边墙 Φ25 锚杆 1.2 m(环向)×0.8 m(纵向)单根长 6.0 m	WH200 型钢架@0.8 m/ 榀; 拱部 Φ25 锚杆 1.2 m (环向)×0.8 m(纵向)、单 根长 4.0 m; 边墙 Φ25 锚杆 1.2 m(环向)×0.8 m(纵 向)、单根长 6.0 m
施工工序	二衬已施作	仰拱已浇筑完成	仰拱未浇筑	仰拱初支尚未闭环

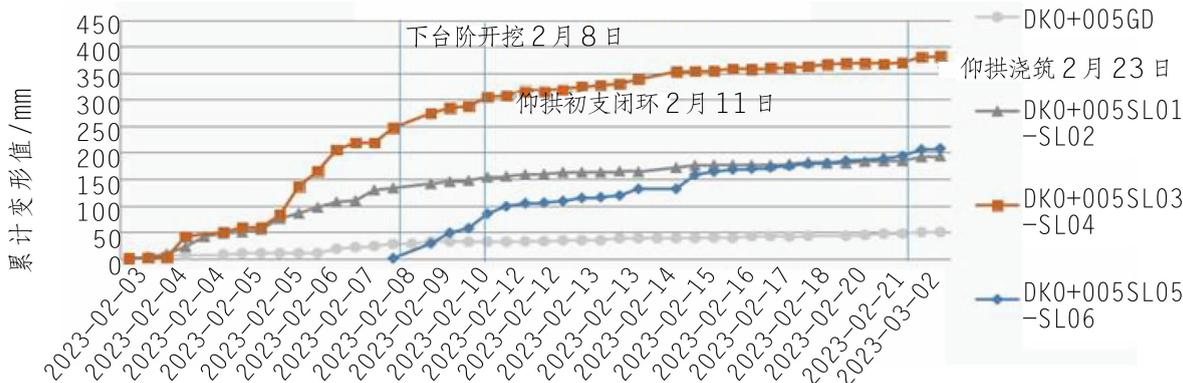


图 3 DK1+005 累计收敛变形曲线图

SL03~SL04 的收敛累计是 SL01~SL02 收敛累计的 2 倍, 是 SL05~SL06 收敛累计的 1.8 倍。拱顶沉降累计变形值为 49.4 mm。

从监控量测仪器的埋设到下台阶开挖时隔 5 d, 累计变形为 246.4 mm, 平均变形速率为 49.3 mm/d(单日最大变形速率为 82.5 mm/d); 至仰拱初支闭环时隔 2 d, 变形量为 41.4 mm(累计变形量为 287.5 mm), 期间平均速率为 13.7 mm/d(单日最大变形速率为 28 mm/d); 至仰拱浇筑时隔 14 d, 变形量为 58.9 mm(累计变形量为 370.1 mm), 期间平均速率为 6.9 mm/d(单日最大变形速率为 15.3 mm/d)。

(2)DK0+915~895 变形段。变形监测断面 DK0+915 的累计收敛变形曲线见图 4, 仰拱已浇筑, 二衬未施作, 变形尚未稳定。其中 SL01~SL02 累计变形量为 156.3 mm, SL03~SL04 累计变形量为 396.6 mm, SL05~SL06 累计变形量为 310.7 mm。SL03~SL04 的收敛累计是 SL01~SL02 收敛累计的 2.5 倍, 是 SL05~SL06 收敛累计的 1.3 倍。拱顶沉降累计变形值为 141.6 mm。

从监控量测仪器的埋设到下台阶开挖时隔

5 d, 累计变形量为 144.7 mm, 平均变形速率为 28.9 mm/d(单日最大变形速率为 45 mm/d); 至仰拱初支闭环施工时隔 7 d, 变形量为 209.1 mm(累计变形量为 353.8 mm), 期间平均速率为 29.9 mm/d(单日最大变形速率为 35.7 mm/d); 至仰拱浇筑时隔 20 d, 变形量为 42.9 mm(累计变形量为 396.7 mm), 期间平均速率为 2.1 mm/d(单日最大变形速率为 31.2 mm/d)。

(3)DK0+895~875 变形段。变形监测断面 DK0+875 的累计收敛变形曲线见图 5, 仰拱未浇筑, 变形尚未稳定。其中 SL01~SL02 累计变形量为 257.3 mm, SL03~SL04 累计变形量为 511.4 mm, SL05~SL06 累计变形量为 203.4 mm。SL03~SL04 的收敛累计是 SL01~SL02 收敛累计的 2 倍, 是 SL05~SL06 收敛累计的 2.5 倍。拱顶沉降累计变形值为 76 mm。

从监控量测仪器的埋设到下台阶开挖时隔 8 d, 累计变形量为 321.7 mm, 平均变形速率为 40.2 mm/d(单日最大变形速率为 70 mm/d); 至仰拱初支闭环施工时隔 7 d, 变形量为 169.2 mm(累计变形量为 490.9 mm), 期间平均速率为 24.8 mm/d(单日最大变形速率为 51.3 mm/d);



图4 DK0+915 累计收敛变形曲线图

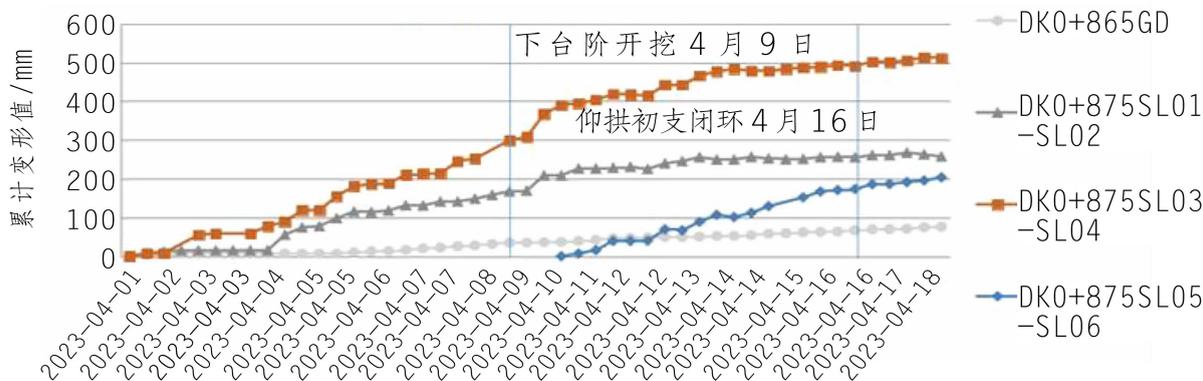


图5 DK0+875 累计收敛变形曲线图

至2023年4月18日时隔2d,变形量为20.5mm(累计变形量为511.4mm),期间平均速率为10.3mm/d(单日最大变形速率为9.5mm/d)。

(4)DK0+875~855变形段。变形监测断面DK0+865的累计收敛变形曲线见图6,仰拱初支尚未闭环,变形尚未稳定。其中SL01~SL02累计变形量为170.1mm,SL03~SL04累计变形量为301.4mm,SL05~SL06累计变形量为192.7mm。SL03~SL04的收敛累计是SL01~SL02收敛累计的1.8倍,是SL05~SL06收敛累计的1.6倍。拱顶沉降累计变形值为59mm。

从监测仪器的埋设到下台阶开挖时隔3d,累计变形量为83.7mm,平均变形速率为27.9mm/d(单日最大变形速率为34.5mm/d);至2023年4月18日时隔6d,变形量为159.2mm(累计变形量为301.4mm),期间平均速率为26.5mm/d(单日最大变形速率为57.6mm/d)。

从各断面变形图可以看出:隧道变形以收敛变形为主,变形位置主要发生在拱脚至拱腰处,拱顶沉降的最大值为141.6mm,拱顶沉降变形相对较小。DK1+020~DK0+915段的左侧变形

量明显小于其右侧的变形量;DK0+915~DK0+895段左侧的变形量明显大于其右侧的变形量;DK0+895~DK0+875段左侧的变形量明显小于右侧的变形量;DK0+875~DK0+850段左侧的变形量明显小于其右侧的变形量。其单侧变形量在81.6~364mm之间,边墙呈不对称变形。单侧的最大变形已达364mm,超过预留变形量,导致部分初支侵限。

此外,从上述变形监测数据曲线可以看出:在钢架闭环之前、下台阶开挖后,该区间段的变形速率较大;仰拱初支施工完成后其变形曲线明显趋缓,开挖至仰拱初支施作完成的累计变形量占总累计变形量的70%~90%。更换更高刚度的拱架以及及时施作系统锚杆、仰拱闭环对隧道变形量的控制具有明显的效果。

4 近平行陡倾薄层状软岩隧道大变形机理分析

近平行陡倾薄层状软岩隧道大变形灾害发生的机制主要是由于地应力方向、层理结构和洞轴线处于不利的组合位置关系^[3]。笔者选取的隧道即为典型案例,其开挖揭露的围岩层理走向与隧



图 6 DK0+865 累计收敛变形曲线图

道轴线呈近平行条件,该条件下围岩会发生由表至深缓慢地沿层理开裂、溃屈破坏现象,且其变形发展具有明显的时滞性,即刚开挖后围岩会发生一定量的收敛变形,经过一段时间后,围岩变形量逐渐增大且在达到预留变形量后继续增大,这正是薄层状软岩隧道边墙由浅至深渐进破裂向内发展的外在表现。围岩开挖后,打破了原有原岩应力平衡状态,在隧道周边岩体中形成了应力差大且应力水平高的应力集中区,致使浅层岩体很快达到极限承载强度而屈服破裂并向隧道空间内挤出,之后应力集中区渐进性地向深层调整转移,继而引发深层岩体破裂,从而使围岩变形显现缓慢,长时间得不到收敛^[4];其次是最大主应力方向与量级决定了大变形的位臵和程度。这是因为最大主应力的方向决定了隧道周边应力集中区的位置,该位置的重分布应力与片理的夹角大小决定了围岩的稳定性与破坏模式,仅在小夹角(近平行)时才会引发一系列沿层破坏问题,且最大主应力越大、应力集中区的重分布应力水平越高,导致沿片理破坏的程度越严重;最后,含片理结构岩体的力学性质的各向异性效应强弱特征亦对大变形的发生具有重要作用,尤其是当片理结构中的云母、绿泥石、方解石等片状矿物含量较多时,导致隧道的围岩强度存在较大差异,这种强度不均匀性导致隧道围岩更易沿薄弱环节发生较大的变形;此外,层状岩体节理面和隐形结构面较多,层状围岩的褶皱、溃屈,隧道穿越较多的断层滑移带,围岩遇水软化等问题更进一步地加剧了层状围岩隧道大变形的不收敛性^[5],这类情况普遍存在于近平行陡倾薄层状软岩隧道中,特别是笔者选取的隧道围岩岩质相对较

弱、层厚相对较薄时沿片理破坏的程度将大为增加,故发生大变形的机率愈高。当隧道的断面尺寸越大、揭露的片理弱面越多,其围岩发生大变形的机率亦越高。

5 变形控制措施建议

根据对薄层状炭质板岩特性和近平行陡倾软岩隧道变形规律进行的分析,笔者对现场隧道变形控制应采取的措施给出了以下几条建议:

(1)型钢的选择:建议对变形大的段落选用 HW175 型钢,加强型钢的刚度及抗扭性,并通过增加钢纤维混凝土的措施将拱架间距由 60 cm 调整为 80 cm 以便于混凝土喷浆密实。

(2)非对称变形控制措施:针对非对称变形段落,及时采用施加系统锚杆的措施对围岩稳定具有较好的效果;同时,为减少支护措施的超额投入,可对收敛变形大的一侧施加较长的锚杆。

(3)加强拱架刚度:建议在拱架连接板与钢架间增设焊接加劲钢板,其不但可以加强拱架刚度,而且能够保证钢架接头处的牢固性;同时,可以利用钢板上增设的开孔进行锁脚锚管施打。

6 结 语

近平行陡倾薄层状炭质板岩隧道作为软岩隧道中典型的存在,这类隧道的岩层普遍存在较为严重的地层挤压、揉皱等现象,导致原本强度不高的隧道围岩极易发生大变形灾害。笔者通过文中进行的研究得出了以下结论:

(1)薄层状炭质板岩自身强度较低,其成分中存在近一半的黏土矿物,遇水极易软化,同时其层理间存在镜面现象,导致其极易发生岩层开裂现象。

(下转第 70 页)

生产措施,通过现场认真落实,结合安全责任制、科技兴安措施,合规投入安全费用,有效地保证了工程施工安全,实现了安全生产“零事故”目标,取得了良好的管理效果和经济效益,具有一定的针对性、可行性、可靠性、经济性,为类似工程建设安全规范化、标准化管理总结出一定的经验,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张璇,谭洪波,吴爽. 水利工程建设施工单位安全生产管理问题探讨[J]. 水利建设与管理,2019,39(12):36-39.
- [2] 田志勇,骆双,廖重阳. 高原峡谷大型水电站起重设备交叉

作业安全管理[J]. 四川水利,2020,41(6):127-131.

- [3] 邹勤. 水电站大坝施工的安全问题分析[J]. 现代物业(上旬刊),2014,13(7):98-99.
- [4] 赵晓妮. 建筑施工安全管理措施优化研究[J]. 山西建筑,2019,45(2):245-246.
- [5] 郭攀. 位于高陡边坡的路基桥梁施工安全措施分析[J]. 山西建筑,2018,44(7):140-141.

作者简介:

袁 亮(1973-),男,四川达州人,分局安全部主任,注册安全工程师、工程师,从事工程建设安全管理工作;

张国平(1976-),男,四川乐山人,项目副经理,高级工程师,从事工程项目管理工作。 (责任编辑:李燕辉)

(上接第 46 页)

提前完成了引水隧洞的衬砌施工,为首台机组发电目标的实现打下了坚实的基础。

7 经济与社会效益分析

原设计方案中的衬砌钢筋为 16 770.333 t,设计方案优化后的衬砌钢筋实施工程量为 13 484.771 t,减少了 3 285.562 t。

该工程采用 EPC 模式,通过设计方案优化减少了实施工程量,降低了施工成本,取得直接经济效益约 1 925.76 万元。引水隧洞衬砌钢筋方案优化后缩短了现场施工工期,使每仓钢筋转运的次数减少,安装钢筋的工序时间缩短,优化后的配筋经受力验算得知:在引水隧洞实施及运行阶段无安全隐患,整体受控。

8 结 语

此次设计方案优化结合工程项目的实际交地

情况,从工期和成本的角度出发,在保证围岩稳定和施工安全的前提下对引水隧洞的衬砌钢筋进行了优化,增大了钢筋间距,节约了钢筋用量,优化后的施工方案其施工工艺得到了简化,节省了隧洞钢筋制安的时间,减少了施工工期,创造出较大的经济效益。

参考文献:

- [1] 水工隧洞设计规范,SL279-2016[S].
- [2] 工程岩体分级标准,GB/T50218-2014[S].
- [3] 水工混凝土钢筋施工规范,DLT 5169-2013[S].
- [4] 水电水利工程锚喷支护施工规范,DL/T5181-2017[S].
- [5] 水电水利工程预应力锚固施工规范,DL/T 5083-2019[S].

作者简介:

林晓旭(1986-),女,四川资中人,副高级工程师,从事水利水电、市政、铁路工程施工技术与管理工作。

夏维学(1972-),男,四川仁寿人,分局总工程师,正高级工程师,从事市政、水电、铁路工程施工技术与管理工作。 (责任编辑:李燕辉)

(上接第 65 页)

(2)通过对隧道典型变形段变形规律进行分析得知:近平行陡倾薄层状软岩隧道极易在隧道拱腰至拱脚边墙处发生大变形灾害,且其变形随岩层走向的改变存在明显的不对称性。

(3)近平行陡倾薄层状软岩隧道大变形灾害的发生机制主要是由于地应力方向、层理结构和洞轴线处于不利的组合位置所导致,隧道开挖后围岩尽早闭环,及时施作系统锚杆以增加拱架刚度等。

参考文献:

- [1] 康永水,耿志,刘泉声,等. 我国软岩大变形灾害控制技术与

方法研究进展[J]. 岩土力学,2022,48(8):21-25.

- [2] 曹兴松,周德培,刘国强,等. 陡倾小交角层状围岩浅埋隧道锚杆支护优化研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,33(增刊 2):1926-1930.
- [3] 郭小龙,谭忠盛,李磊,等. 高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J]. 土木工程学报,2017,50(增刊 2):38-44.
- [4] 张宁,郑国强,袁文强,等. 陡倾层状软弱围岩隧道变形特征及变形处治技术研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会议论文集,中冶建筑研究总院有限公司,2022:1022-1027.
- [5] 陈子全. 高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究[D]. 西南交通大学,2019.

作者简介:

孙慕楠(1995-),男,天津宝坻人,工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理与质量管理工作。 (责任编辑:李燕辉)