

软弱岩层隧道掘进多种异常情况的综合处理措施

张朋岗, 王俊贤, 鲁金贵, 刘铁

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘要:通过对软弱岩层隧道施工中出现的掌子面涌水、塌方、初期支护变形开裂等具体情况的处理,提出了综合处理措施理念,重点介绍了综合处理的程序和各项措施的施工要点,验证了快速稳固效果,所取得的经验可供类似工程参考。

关键词:软弱岩层隧道;涌水;塌方;变形开裂;快速稳固;综合处理;杜玖隧道

中图分类号:U455;U455.4;U455.2

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2022)03-0093-06

Comprehensive Treatment Measures for Various Abnormal Scenarios Occurred During Excavation of Soft Stratum Tunnel

ZHANG Penggang, WANG Junxian, LU Jingui, LIU Tie

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610066)

Abstract: Based on the treatment of water gushing and collapse at the excavation face, deformation and cracking of initial support in soft stratum tunnel construction, the concept of comprehensive treatment measures is put forward in this paper, and the comprehensive treatment procedures and key construction points of various measures are introduced and verified to be efficient and stable. Experience accumulated in this paper can be used as reference for similar projects.

Key words: soft stratum tunnel; water gushing; collapse; deformation and cracking; fast and stable; comprehensive treatment; Dujiu Tunnel

1 概述

两河口密瓦段杜玖隧道全长 1 534 m,桩号为 K89+056.00~K90+590.00,出洞口 17 m 为明洞设计,隧道开挖跨径为 10.5 m。其中 K90+474.50~K90+571.00 洞段主要穿越中~强风化砂质板岩;岩体松散、破碎,裂隙发育,为 V 级围岩;多部位呈土石胶结体状。该洞段主要采用 SQ_{7.5}^{1A}型和 V_{7.5}型衬砌施工;超前支护主要为 30 m 长、Φ108 mm 的超前管棚和超前小导管。

隧道出口段施工过程中,在其左侧高位冲沟的水压作用下,渗流体通过围岩裂隙和松散土体于 K90+474.50 处掌子面左侧(沿桩号方向)拱脚处涌出形成涌水,水体携带少量泥沙,通过水泵抽排估算其涌水量约为 96 m³/h。

左侧岩体中的细颗粒(泥沙)经涌水通道排出,同时流水导致岩体进一步软化,造成其相互间的摩擦力和嵌挤力减小,失去了原有的受力平衡状态,造成掌子面塌方。该塌方位于左侧拱顶部位,长约 7.8 m,宽约 3.6 m,深达 5.6 m

以上,呈不规则多边形状。

在此软弱岩层地质条件下,随着水体通过涌水通道排出使岩层内的水压力得到释放,在水流走的同时携带走了裂隙中的泥沙,导致初期支护外部围岩或土体原有结构短时间内发生了较大改变而失稳,产生了对初期支护结构快而猛的较大压力,导致 K90+488.50 位置左半侧出现了肉眼可见的初期支护开裂现象,裂缝的最大宽度达 9 cm,已延伸过拱顶。通过紧急组织隧道出口段量测发现:K90+551.00~K90+571.00 段主要为拱腰附近,变形量较小,最大周边位移累计值不超过 62 mm,最大拱顶下沉累计值不超过 23 mm;K90+476.00~K90+516.00 段主要为拱脚至拱顶整个左半侧,其中 K90+476.00~K90+507.00 段表现的最为严重,最大周边位移累计值达 343.28 mm,最大拱顶下沉累计值达 81.73 mm。因此,必须采取有效措施进行治理。为此,项目部研究制定了针对软弱岩层隧道掘进多种异常情况的综合处理措施,阐述于后。

收稿日期:2022-04-04

2 快速稳固综合处理措施

2.1 综合处理程序

通过对掌子面的涌水、塌方、初期支护变形开裂原因进行分析后,不难得出它们相互之间是以涌水携泥沙排出造成岩体结构失稳而形成的关联体,因此,需要根据其严重情况、产生的原因和相互之间的联系采用合理的程序进行综合处理,以避免处理不当造成事态扩大,达到快速稳固的目的。

综合处理程序的整体思路:

(1)为避免不稳定情况进一步发展而出现局部洞段或全洞段坍塌等严重情况,应采取回填渣料反压这种施工速度快、可迅速起到反作用力的措施进行应急处理。

(2)由于经压实的渣料属柔性材料体,失去稳定的地层作用于初期支护会使其产生持续、缓慢的变形,因此,应在初期支护变形较大的部位进行临时型钢支撑加强,使变形结构快速达到稳定状态。

(3)鉴于 K90+476.00~K90+507.00 段初期支护变形最为严重(已出现开裂现象),仅依靠以上两种措施恐难达到预期效果,需要采用护拱对该段进行补强加固。

(4)考虑到支护结构对隧道工程主体安全和质量的影响,应根据实际情况对变形段和掌子面塌腔分别采取小导管注浆、混凝土回填塌腔等永久支护措施进行稳固。

(5)采用小导管注浆加固措施后,通过超前钻孔和观察涌水量、携带泥沙量情况,研究采用涌水导排、超前小导管预注浆堵水或超前围岩预注浆等措施进行处理。

特别需要注意:在完成永久支护稳固措施前,不得对掌子面涌水采取注浆等方式进行封堵,以避免地层在高位冲沟水的作用下重新充满水,导致已不稳定的围岩(或土石结构)与水压力共同作用在初期支护结构上使变形、开裂情况进一步扩大。综合处理程序详见图 1。

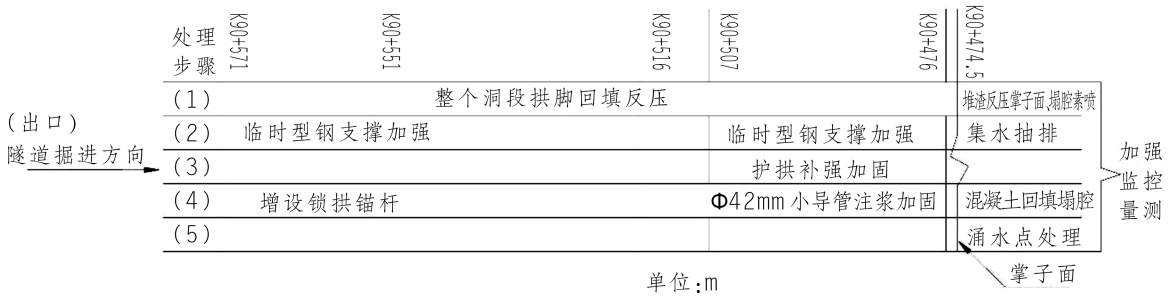


图 1 综合处理程序示意图

2.2 各项处理措施的实施

各项处理措施的相关参数均应针对现场具体情况制定,施工时必须严格遵循综合处理程序,以确保达到良好的预期效果。

2.2.1 回填反压应急处理

(1)掌子面回填反压。为保持掌子面整体稳定,采用了整个掌子面回填反压^[1]措施。反压体为底宽 7.93 m、顶宽 1 m、高 4.93 m、外坡比为 1:1 的梯形结构。掌子面回填反压情况见图 2。底部涌水通道处采用块石回填以便于排水;其上部采用土石混合料回填;距拱顶以下 2 m、机械操作不方便的范围采用人工堆填沙袋(50 kg/个)。

(2)整个洞段拱脚回填反压。采取对整个洞段的拱脚实施回填反压措施,确保已开挖洞段的

整体稳定。回填料采用隧道出口段开挖的土石混合料,反压范围为两侧拱脚,反压体为底宽 3 m、顶宽 1 m、高 2 m、外坡为 1:1 的梯形结构。由于初期支护变形开裂最为严重的洞段紧挨掌子面,因此采用从内向外进行反压的施工措施可以达到应急效果。为保证反压效果,反压体采用分层回填分层碾压的方式进行施工,将分层厚度控制在 40 cm 以内,将压实度尽量控制在 80% 以上。

2.2.2 临时型钢支撑加强

在拱脚回填反压完成后,及时采用 I18 工字钢分别对 K90+476.00~K90+516.00 段和 K90+551.00~K90+571.00 段初期支护的两侧进行临时钢支撑加固^[2]。斜撑的上端支撑在变形最大的拱腰部位(高度为 3.5 m),使临时型钢支撑更

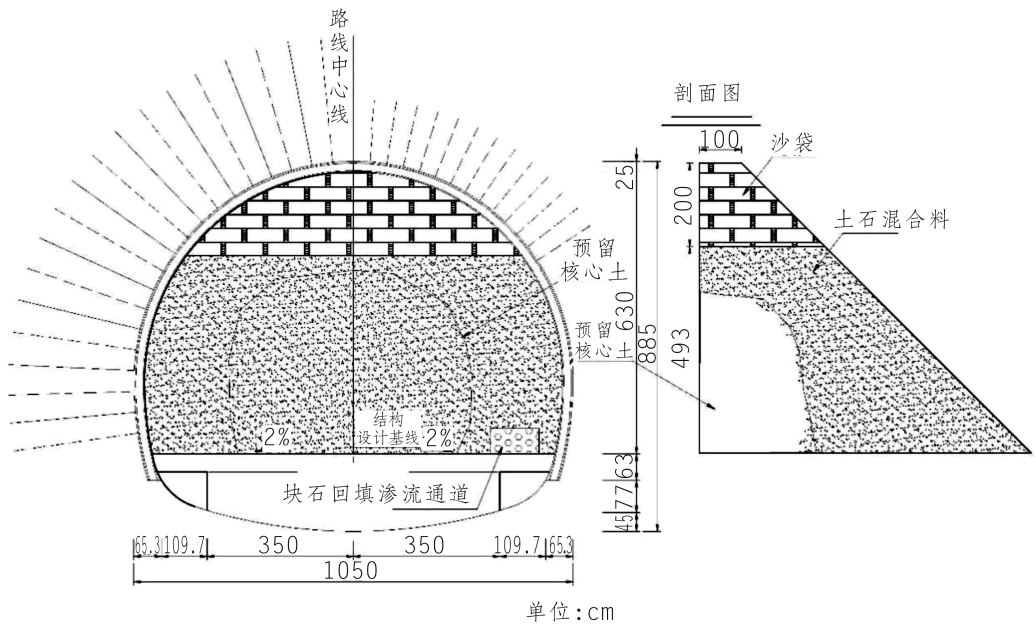


图 2 掌子面回填反压示意图

有效地对初期支护施加反作用力以遏制反压处理后缓慢变形的趋势。

2.2.3 严重变形段护拱补强与换拱处理

(1) 护拱补强施工。由于 K90+476.00~K90+507.00 段初期支护变形、开裂情况最为严重,范围超过整个左半侧,此时采用拱脚反压和拱腰的型钢支撑措施对上部作用效果欠佳,而通过设置护拱的措施可以在变形结构的内侧形成完整的拱形抗力结构,使该段整个支护断面得到护拱补强^[3]。护拱采用 I18 工字钢与原有初期支护密贴;布置间距为 1 m;采用 $\Phi 22$ mm 自进式砂浆锚杆锁脚,锁脚锚杆的长度为 4.5 m,分别设在各节点部位。护拱之间采用 $\Phi 22$ mm 螺纹钢进行纵向连接,在设置 $\Phi 6$ mm、间距为 20 cm 的钢筋网片后进行 C20 喷混凝土施工,厚度为 20 cm。

(2) 换拱处理施工。由于该段变形量较大,造成初期支护大面积侵线,因此,必须在二次衬砌施工前进行换拱处理。为保证施工安全,在全断面小导管注浆加固达到预期效果的情况下,采取分段、分步、分序施工的方式进行拆换。每个施工段长度为 3.2 m(4 榀型钢拱架);每个施工段按照型钢拱架设计的 5 节段先拱顶、再拱肩、最后拱墙的顺序分步进行施工,同一施工段的相同节段一次施工,如同一施工段上的 4 榀型钢拱架的拱顶

节段同时拆换;拱肩和拱墙节的左右侧按照“谁弱谁后拆换”的原则先进行右侧施工。护拱拆除后,复测型钢拱架初期支护的变形和侵线情况,确定拆除部位,型钢拱架按照设计图纸重新施工。每个施工段完成后,及时施做仰拱并回填片石混凝土压重;在满足一个衬砌段后应及时进行衬砌混凝土施工,进一步促进隧道的整体稳定。

2.2.4 实施永久支护措施加强稳固

从隧道结构安全稳定性出发,分情况实施永久支护稳固措施,主要为:对掌子面塌腔采取回填混凝土措施,对 K90+551.00~K90+571.00 段采取增设锁拱锚杆措施,对 K90+476.00~K90+516.00 段采取全断面小导管注浆措施。

(1) 掌子面塌腔回填。因塌腔较小,最终采用 C20 自密实混凝土进行掌子面塌腔回填^[4]。在掌子面反压体施工到距拱顶 1.8 m 左右时,正式回填前先由人工采用辅助支架从侧面将喷头伸入塌腔内对塌腔进行素喷,稳固其内部块体;正式回填在反压至拱顶后进行,通过反压体施做底部支撑,泵送入仓回填。掌子面塌腔回填施工情况见图 3。

① 利用 I18 工字钢和钢管在反压体顶部设置悬挑支撑进行底模施工。底模施工时,沿反压体外侧中间位置间隔 1 m 预埋两根伸入塌腔的 $\Phi 90$ mm 钢管,伸入深度分别为 2 m 和 4 m,作为混凝

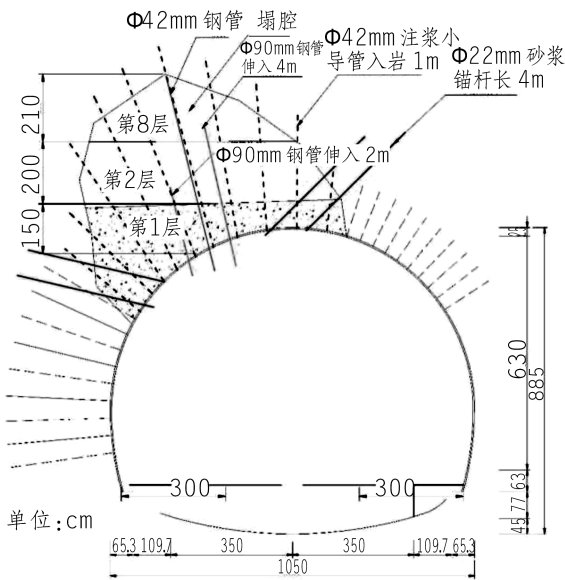


图3 掌子面塌腔回填施工示意图

土回填的入仓口;同时,在塌腔内设置1根伸入顶部的 $\Phi 42$ mm钢管作为排气孔和回填检查孔。

②塌腔混凝土采用分层回填的方式,自下而上的分层高度分别为1.5 m、2 m和2.1 m,根据塌腔断面尺寸估算混凝土量,第1层由埋入深度为2 m的钢管入仓,后两层由埋入深度为4 m的钢管入仓。前两层混凝土的回填施工需间隔3 d,此时第1层混凝土结构已具备一定的强度,可与下部支撑结构共同承受上部荷载,从而进一步确保了支撑的稳定。

③根据分层回填时间间隔要求,混凝土施工完成的时间为7 d左右,在对其底部支撑和部分顶部反压体拆除后及时沿塌方空腔径向施打 $\Phi 42$ mm小导管进行围岩注浆,小导管入岩深度不小于1 m,间距为1 m,排距为0.8 m,梅花形布置。另外,沿塌腔两侧位置各施打两排 $\Phi 22$ mm砂浆锚杆,长度为4 m,间距为1 m,排距为0.8 m,穿过回填混凝土并深入基岩内不小于1 m,将回填混凝土与围岩联结成整体。

(2)小导管注浆加固。鉴于K90+476.00~K90+516.00洞段初期支护背后很可能出现了较大范围的松散体和局部空腔,遂采用 $\Phi 42$ mm钢管进行了全断面小导管注浆加固^[5]处理,对初期支护背后的地层进行固结。施工前,采用地质雷达进行断面扫描,结合钻孔测速经验判断初期

支护背后是否存在空腔以及空腔的范围,以确定采用适合的材料进行灌注。对于不存在空腔的部位采用水泥净浆灌注;对于存在局部空腔的部位采用水泥砂浆灌注。钢管管按 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 梅花形布置,深度为2 m; $P\cdot O42.5$ 水泥净浆水灰比宜为0.5~0.8,水泥砂浆的强度不小于M20;自下而上间隔注浆,将注浆压力控制在0.2~0.5 MPa。

(3)增设锁拱锚杆。鉴于K90+551.00~K90+571.00洞段初期支护变形部位较为集中且变形量较小,主要表现为型钢拱架内移,因此,采用在其两侧相应位置增设两排锁拱锚杆的措施可以起到较好的、有针对性的加固效果。锁拱锚杆采用长度为3 m的 $\Phi 22$ mm砂浆锚杆,两排环向间距为60 cm,每排的每榀型钢拱架设2根,即每榀型钢拱架共8根;采用 $\Phi 22$ mm的纵向连接筋与锁脚锚杆端部焊接连接成整体;再次补喷加固。

2.2.5 涌水的处理

根据所确定的综合处理程序,涌水处理分为两个阶段:

第一阶段为掌子面回填反压应急处理阶段。在涌水流经位置设置断面为 $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的块石回填带,反压体回填后形成暗沟,使水顺利通过塌方体和反压体并引至集水坑进行抽排处理。

第二阶段在采取永久支护措施进行稳定加固后。全断面小导管注浆对围岩裂隙和涌水通道起到了一定的封堵作用,使掌子面的出水量明显减少,仅存在少量渗流且泥沙含量极少。另外,在涌水点上方1 m左右设3个、深9 m的超前钻孔,分别布置在隧道径向侧壁、涌水点正上方和距正上方1 m处。结果显示:第一个超前钻孔未出现流水现象,第二个超前钻孔与涌水点出水量基本相同,第三个超前钻孔出现了少量外浸水。结合地质超前预报,综合考虑目前出水量、泥沙携带量均极小的情况,该工程对渗水主要采取了集中引排措施。

2.3 加强监控量测

鉴于初期支护变形较为严重的K90+476.00~K90+507.00段隧道埋深 H_0 已远大于2.5倍的隧道开挖宽度 B ,初期支护的稳定情况除进行洞内观察外,主要通过周边位移及拱顶下沉监

测完成。因此,监测断面的加密和监测频率的加大是进一步掌握围岩、初期支护稳定性的最有效手段。

(1)加密布设监测断面:对初期支护变形段的拱顶和两拱腰分别增设了拱顶下沉测点和周边位移测点,加密后的测点纵向间距不超过 5 m,测点钻孔埋设深度不小于 0.2 m。

(2)加大监测频率:周边位移采用收敛计观测,拱顶下沉采用水准仪观测,观测频率较规范规定的正常情况下呈 2 倍以上增加。具体的量测频率见表 1。

表 1 量测频率一览表

位移速度 / $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	量测频率 / $\text{次} \cdot \text{d}^{-1}$
≥ 5	4
1~5	3
0.5~1	2
0.2~0.5	1
< 0.2	1

通过对量测数据进行统计、分析和绘制位移-时间曲线,可直观地反映围岩和支护的稳定状态,以便及时预警或指导现场调整处理措施和具体的处理参数。

2.4 所采取的后续施工控制措施

(1)调整支护参数,提高支护强度。开挖揭露的地质情况表明:出口洞段多为土石结合体和部分松散、破碎围岩,原 $\Phi 22 \text{ mm}$ 的砂浆锚杆对该洞段的稳固效果相对较差,因此,在与设计沟通后将拱部 150° 范围调整为 $\Phi 42 \text{ mm}$ 大角度注浆小导管,对隧道拱部进行注浆固结。径向注浆小导管长度为 3 m,环向间距为 100 cm,纵向间距为 100 cm;一环 45° 角,一环 90° 角,交错布置。采用 PO42.5 水泥净浆注浆,水灰比宜为 0.5~0.8,自下而上间隔注浆,将注浆压力控制在 0.2~0.5 MPa。

(2)及时进行二衬混凝土施工。初期支护变形段在采取相应措施加强稳固后,应及时组织进行混凝土二衬施工,45 cm 厚的 C30 高强度钢筋混凝土结构可为初期支护提供可靠的支撑作用,与初期支护共同抵抗外部围岩压力、构建平衡稳定体系以确保隧道工程安全。其他洞段利用隧道

软岩变形控制中“先放后抗”的原理^[6],在围岩变形有所减缓时,及时实施二衬混凝土施工跟进,有效控制围岩变形。

3 处理效果评价

(1)掌子面涌水的处理效果。处理措施实施后,长时间未出现水量增大和水体变浑浊现象,且未对初期支护和岩基产生不利影响;出水点单一,可在隧道混凝土衬砌和仰拱施工时采用 $\Phi 90 \text{ mm}$ PVC 管将水集中引排至中心排水沟内做永久排水处理。

(2)掌子面塌方的处理效果。通过回填反压措施对掌子面施加反作用力,有效控制了掌子面剥落、滑坍现象;顶部塌腔回填密实,与周围岩层连接牢固,整体性良好。在后续施工过程中,通过严格控制正台阶环形开挖预留核心土施工工法,采取了对掌子面初喷并及时施做初期支护等稳固措施,已顺利穿过隧道出口 V 类围岩地层段。

(3)初期支护变形开裂的稳固处理效果。K90+551.00~K90+571.00 洞段初期支护变形量较小,经回填反压和型钢临时支撑后岩体变形情况立即得到有效控制,在同时采取增设锁拱锚杆对永久支护进行加强稳固后,经处理完成到钢筋混凝土二次衬砌施工时其变形量已极小。

鉴于 K90+476.00~K90+507.00 洞段初期支护变形量较大,处理过程中采取了多种稳固措施进行处理,各项措施的实施对变形控制体现为逐步加强过程。通过监控量测数据(位移)-时间曲线(拱顶下沉累计值-时间曲线见图 4,周边位移累计值-时间曲线见图 5)具体分析如下:

① 在初期支护变形开裂现象出现后(2021 年 8 月 9 日),所采取的回填反压应急措施对周边位移和拱顶下沉均起到了有效的控制作用,但变形情况仍在缓慢发展,尤其是反压体不能直接作用到的位置其变形速度(反映为拱顶下沉)相对较大。

② 实施临时型钢支撑加固后(2021 年 8 月 11 日),初期支护的变形速度明显下降,切实起到了支撑加强和变形遏制作用。

③ 护拱对隧道整体断面具有较大的稳固作用;护拱施工完成(2021 年 8 月 13 日)并经过 1~

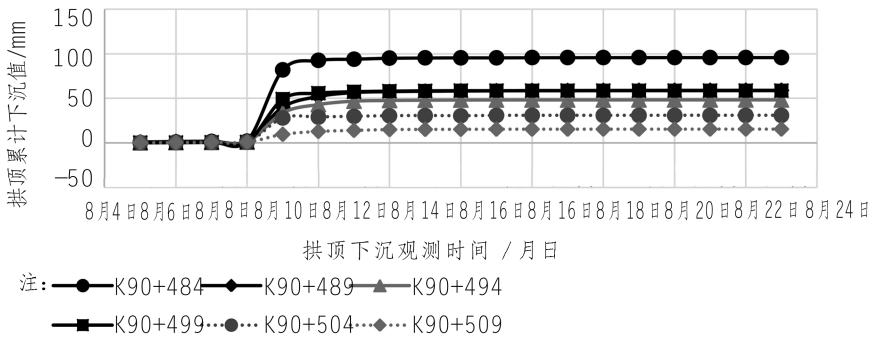


图4 拱顶下沉累计值-时间曲线图

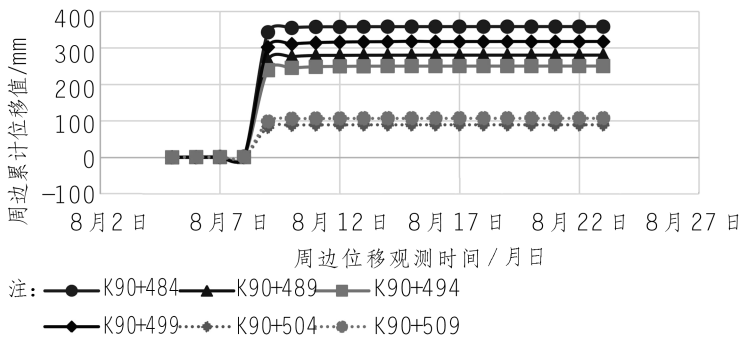


图5 周边位移累计值-时间曲线图

2 d 的短时间过渡后,其周边位移和拱顶下沉曲线逐渐向平缓状态发展并出现收敛趋势。

④ 通过拱顶下沉累计值-时间曲线图和周边位移累计值-时间曲线图看,初期支护出现较大变形后 4 d 左右已达到基本稳定状态,说明所采取的处理措施具有快速稳固特点。

⑤ 经探查,小导管注浆已使初期支护外侧 1.5 ~ 2.5 m 左右范围的地层良好固结,形成了完整的拱形结构圈,所产生的薄壳效应应具有较大的受压特性,不仅会对初期支护变形起到较大的遏制作用,而且永久支护的加强会进一步提高隧道整体结构的安全系数。

4 结 语

软弱岩层隧道施工过程中发生不良异常情况的可能性较大,且一旦出现往往伴随着一到数种情况发生。通过对隧道掌子面涌水、塌方、初期支护变形开裂的产生原因进行分析,较准确地推断出其相互之间的关联性,经过研究后确定了科学的综合处理措施并予以实施,避免了因盲目处理而导致的情况恶化,达到了快速稳固的目的,所取得

的经验可为类似工程情况处理提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杨波,任尚强. 详解回填处理隧道掌子面塌方方法[J]. 公路交通技术,2020,36(4):90-93.
- [2] 邓昱宏. 槽渣滩隧道初期支护变形开裂施工处治[J]. 公路交通技术,2014,30(3):105-108.
- [3] 刘欢,陈亚军. 浅埋软弱围岩隧道初期支护变形开裂分析及处理[J]. 福建质量管理,2019,40(18):140-141.
- [4] 赵延露,康捷. 缙云山隧道掌子面塌腔处理措施[J]. 中国新技术新产品,2017,25(15):98-99.
- [5] 林树心. 隧道初期支护变形侵限原因分析及处理技术[J]. 福建建材,2019,38(4):93-94.
- [6] 梁稽哲. GANNTANS 隧道初期支护开裂变形分析及处理[J]. 工程建设与设计,2018,66(2):200-202.

作者简介:

- 张朋岗(1987-),男,河北邢台人,工程师,从事水利水电及公路工程
工程施工技术与管理工作;
王俊贤(1993-),男,河北邯郸人,技术员,从事公路工程施工技术与
管理工作;
鲁金贵(1989-),男,湖北秭归人,工程师,从事水利水电工程施工
技术与管理工作;
刘 铁(1982-),男,四川成都人,工程师,从事水利水电工程施工
技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)