

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.10.016

隧道塌方“三段四步法”安全处治 技术应用研究

吴学智¹, 代成良², 刘庆舒¹, 张丹¹, 黄鹏¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130;

2. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要:以安全风险极高的“关门式”隧道大塌方为研究对象,以创新的“三段四步法”为技术路线,经工程实例验证,并进行了总结研究。在成功处治多起此类隧道大塌方的基础上,创新了较为通用的隧道塌方“三段四步法”安全处治技术(“三段”是指塌方段及其两端塌方影响段;“四步”是指依次施工的步骤)。本技术方法以隧道塌方段、紧临隧道塌方段的可见塌方影响段和不可见塌方影响段为处治对象。“三段四步法”的主要技术方法为:隧道塌方后,首先根据塌方段及塌方影响段的实际工程地质情况、塌方情况、塌腔稳定情况、塌方影响段的变形情况、设计及施工等情况,综合分析判断各段的安全风险情况,分段评价安全风险大小;其次根据安全风险评价结果,按照从安全风险低的位置向安全风险高的位置逐步推进的方式确定合理的施工顺序及施工步骤。按照此技术方法和对应的技术方案完成“关门式”隧道大塌方处治。以王麻子隧道1#紧急停车带“关门式”隧道大塌方为例,通过方案比选,以“三段四步法”为处治技术方法,并按对应的技术方案安全有效地处治了隧道大塌方。实践证明“三段四步法”是一种安全有效处治“关门式”隧道大塌方的技术方法,此法具有通用性、可操作性和安全性。

关键词:隧道工程;三段四步法;塌方处治;关门式大塌方;安全技术

中图分类号:U458.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2022)10-0123-09

Application of “Three-section and Four-step” Safety Treatment Technology for Tunnel Collapse

WU Xue-zhi¹, DAI Cheng-liang², LIU Qing-shu¹, ZHANG Dan¹, HUANG Peng¹

(1. Chengdu Engineering Co., Ltd., of China Power Construction Group, Chengdu Sichuan 611130, China;

2. Huaneng Tibet Yaluzangbujiang Hydropower Development Investment Co., Ltd., Lhasa Xizang 850000, China)

Abstract: Taking the “closed-door” tunnel collapse with high safety risk as the research object, based on the innovative technical route of “three-section and four-step” method, it is verified by engineering example and the summary is carried out. On the basis of successfully treatment of many such large tunnel collapses, the relatively common “three-section and four-step method” safety treatment technology for treatment tunnel collapse treatment is innovated (“three-section” refers to the collapsed section and the collapse-affected sections at both ends, “four-step” refers to the steps of sequential construction). This technical method takes the tunnel collapse section, the visible collapse affected section immediately adjacent to the tunnel collapse section, and the invisible collapse affected section as the treatment objects. The main technical method of “three-section and four-step” method is: after the tunnel collapse, first, according to the actual engineering geological condition of collapse section and the collapse affected section, collapse condition, collapse cavity stability, deformation, design and construction of the collapse affected section, to comprehensively analyze

收稿日期: 2021-04-26

作者简介: 吴学智(1974-), 男, 甘肃静宁人, 硕士, 正高级工程师。(358755221@qq.com)

and judge the safety risk of each section, and evaluate the safety risk in sections. Second, according to the result of safety risk evaluation, to determine the reasonable construction sequence and steps according to the way of gradually advancing from the position with low safety risk to the position with high safety risk. According to this technical method and the corresponding technical scheme, the treatment of the “close-door” tunnel collapse is completed. Taking the “close-door” tunnel collapse of Wangmazi tunnel No. 1 emergency parking zone for example, through scheme comparison and selection, the tunnel collapse is treated safely and effectively treated by using the “three-section and four-step” treatment technical method and the corresponding technical scheme. Practice has proved that the “three-section and four-step method” is a safe and effective technical method to treat the “closed-door” tunnel collapse, it has versatility, operability and safety.

Key words: tunnel engineering; three-section and four-step method; collapse treatment; close-door collapse; safety technology

0 引言

我国基础建设举世瞩目,公路、铁路等隧道建设成就辉煌。在隧道建设过程中,发生过不少隧道塌方事故,但杜绝不了再塌方的悲剧。为了提高塌方处理的可操作性,防止小塌方变成大塌方,能及时安全有效地处治隧道塌方,有必要对隧道塌方安全处治技术进行系统研究。

近年,吴学智^[1-2]采用自进式中空锚杆限量注浆的技术处理了塌渣块石架空、小导管难以成孔、吃浆量大的超大型隧道塌方;刘智勇等^[3]采用注浆小导管限量注浆处治了某关门式隧道大塌方;罗治国^[4]对富水软弱围岩隧道塌方机理进行了研究;任和祥^[5]对高海拔寒冷地区软岩公路隧道塌方处治方案进行了研究;杨林^[6]对浅埋大断面公路隧道塌方处治措施及效果进行了分析;剧仲林^[7]对“关门”塌方原因进行了力学分析;袁永才等^[8]对山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用进行了研究;肖东辉等^[9]介绍了T76S自进式螺旋注浆管棚在隧道塌方治理中的应用,并对其支护效果进行了评价;关晓吉^[10]采用可拓云模型的隧道塌方风险等级评价方法对隧道塌方的安全性进行了评价;吕擎峰^[11]采用模糊层次和后果当量法对隧道塌方风险进行了评估;祁文睿等^[12]研究了公路隧道穿越软弱破碎围岩综合施工及监测技术;张晓今等^[13]研究了浅埋山岭隧道软岩段的塌方原因及处治技术;王秋生等^[14]对深埋大断面隧道土石复合地层塌方机制及处置措施进行了评价;侯艳娟等^[15]对隧道施工塌方事故分析与控制技术进行了研究;张毅^[16]等对弱膨胀土地区隧道施工方法及塌方进行了研究;李志强^[17]等对浅埋黏土层大跨度隧道施工技术与塌方风险进行了分析;李祝龙^[18]等对波纹管用作隧道逃生管

道时的情况进行了模拟分析。

前人从工程实践及理论方面对隧道塌方处理进行了较为深入的研究,但每处隧道塌方情况都不相同,处理方法均存在差异,目前缺乏一套系统、规范、安全、实用的隧道塌方处治技术。

为积极响应“十四五”规划和2035年远景目标。随着具有高海拔、高地应力、软岩大变形、岩爆、断层破碎带及涌水等不良地质条件的世界屋脊川藏铁路及雅鲁藏布江下游水电站等国家级大型工程项目的开工建设,为减少塌方或更好地处治塌方,本研究以王麻子隧道“关门式”大塌方为例,对创新的“三段四步法”隧道塌方安全处治技术进行系统的总结研究。

1 工程概况

1.1 工程概况

本隧道工程为四川省境内某大型水电站库区岸坡山体滑坡改线公路王麻子隧道,隧道起讫桩号K4+194~K6+522,隧道长2 328 m。隧道设计标准参考四级公路标准,隧道内双向行车道宽度2×3.0 m(不含两侧0.25 m路肩)。隧道建筑限界:7.0 m(宽)×4.5 m(高)(正洞段);10.25 m(宽)×4.5 m(高)(紧急停车带段)。

1.2 水文地质

隧道区无大型地表水体。隧道围岩为奥陶系下统(O1(S))黑色页岩、泥质细砂岩,岩体呈微风化-新鲜,完整性较好,薄层-中厚层状结构,岩层产状为 $160^{\circ}\sim 180^{\circ}\angle 30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,岩层走向与隧道洞轴线呈小角度相交,岩层中倾,节理不发育,结构面呈闭合状,该段地下水不丰富,以地表降雨补给基岩裂隙水为主,地下水呈渗水-滴水状。

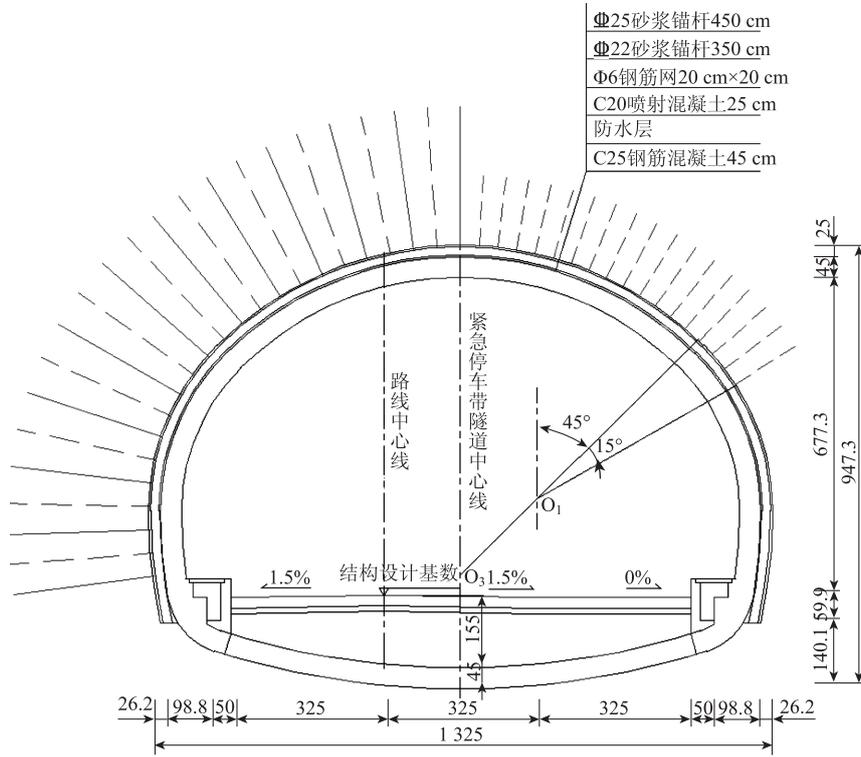


图 1 IV_{7.0}^T 型衬砌断面 (单位: cm)

Fig. 1 Section of IV_{7.0}^T type lining (unit: cm)

塌方段为节理裂隙较发育、呈块体构造的 IV₂ 级 (IV 级偏差) 围岩, 开挖时无水。隧道塌方段埋深 200~203 m, 地表为相对较平缓的自然斜坡。塌方后, 塌方段呈淋雨状裂隙水, 无水压, 最大出水量 3.8 m³/h。

1.3 原设计支护参数

隧道塌方段采用 IV_{7.0}^T 型复合衬砌 (IV 级偏差围岩紧急停车带衬砌类型)。C30 钢筋混凝土衬砌厚度 45 cm。

I18 钢架间距 100 cm, 每榀钢架设 8 根水泥砂浆锁脚锚杆 (Φ22, 350 cm/根); 钢架间内外交错布

置 Φ22 纵向连接钢筋, 环向间距 100 cm。图 1 中, 左侧一半表示系统锚杆, 右拱部一半表示超前锚杆。另一半图中未示, 均对称布置。其余支护参数详见图 1 及表 1。

2 隧道塌方及影响情况

2.1 塌方情况

隧道 1# 紧急停车带 (K4+775~K4+825 段), 于 2020 年 4 月开始施工, 2020 年 5 月 20 日完成开挖及初期支护。实际围岩级别与原设计相符。

表 1 IV_{7.0}^T 型衬砌支护参数表

Tab. 1 Support parameters of IV_{7.0}^T type lining

初期支护						二次衬砌	
喷层	系统锚杆	钢筋网	钢架	超前支护	预留变形量	钢筋混凝土衬砌	配筋
C20 混凝土 厚度 25 cm	拱部及边墙, Φ22 砂浆锚杆, L = 350 cm, 环向及纵向间距 100 cm	单层 Φ6 钢筋网, 网格间距 20 cm	I18 钢架, 间距 100 cm	拱部 120°, Φ25 砂浆锚杆, L = 450 cm, 环向间距 40 cm, 纵向排距 300 cm	8 cm	全环 C25 钢筋混凝土衬砌, 厚度 45 cm	双层主筋: Φ22 环向主筋, 纵向间距 250 mm; Φ12 纵向筋, 环向间距 200 mm; Φ6 箍筋: 环向间距 50 cm, 纵向间距 25 cm

2020 年 7 月 5 日前, K4+800~K4+825 段监控量测值在规范范围内。2020 年 7 月 5 日后, 工程区连降暴雨, K4+800~K4+825 段拱部初期支护喷混凝土出现局部开裂及滴水现象, 拱顶偶有掉块, 拱顶沉

降速率变大。7 月 20 日—24 日, K4+815 拱顶沉降速率依次为: 10, 11, 12, 30, 50 mm · d⁻¹。此处累计沉降量 50 cm。塌方前 5 d 的位移-时间曲线见图 2、图 3。

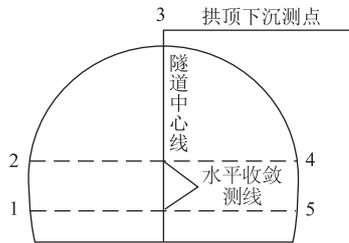


图2 隧道横断面监测点位及编号

Fig. 2 Location and numbers of monitoring points in cross-section of tunnel

2020年7月24日,隧道掌子面桩号K4+918。出现过大变形后,当天暂停施工,当晚10:00前撤出了洞内所有施工人员和最大变形段与掌子面之间的机械设备。2020年7月25日凌晨2点左右,K4+800向大里程段拱顶塌方,大塌方后为间歇性小塌方及掉块。

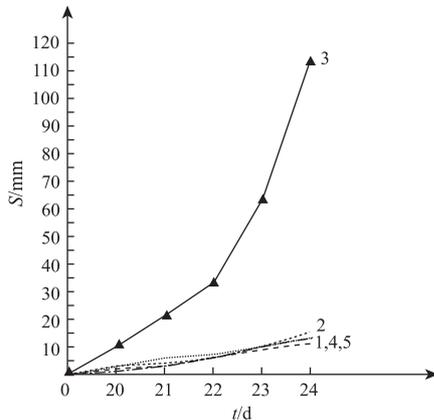


图3 K4+815 时间-位移曲线

Fig. 3 Time-displacement curve of K4+815

2020年7月28日,塌方基本趋于稳定,偶有零星掉块。塌渣基本填满了塌方下部隧道,塌渣呈碎块状

(直径约0.1~0.5 m)。根据实际工程地质条件及施工情况,推测塌方段为K4+800~K4+825段,初步判断:隧道拱部110°范围内塌方,塌方高度约3~8 m,塌方约1500 m³。后续施工知,以上预测与实际相符。

2.2 塌方影响情况

塌方后,K4+775~K4+790段拱顶局部出现纵向裂缝及大面积喷混凝土脱落情况。K4+790~K4+800段,隧道右拱部存在一条顺线路向的贯通性纵向张开裂缝,喷混凝土开裂,局部剥落。裂缝处,初支钢架出现明显的内挤扭性剪切变形,本塌方影响段潜在垮塌的高风险。

不可见塌方影响段是与紧急停车带紧邻的正常断面,推测最少为10 m,实际为15 m,即K4+825~K4+840段。

3 施工情况

现场按原设计支护参数施工,具体支护参数见图1及表1。

采用大断面(宽12.85 m,高8.04 m),大进尺(2~2.5 m/循环)开挖,暂未开挖仰拱。开挖后及时进行了钢架及喷混凝土初支工作,初支紧跟掌子面,但隧道拱顶大量超挖没有喷混凝土及泵送混凝土回填密实,超挖脱空的腔面无任何有效支护。

塌方后,在K4+780拱顶初支喷混凝土脱落处凿孔测量知,初支钢架与岩面之间超挖脱空64 cm。隧道仰拱施工至K4+800,距离掌子面118 m;隧道二次衬砌至K4+745,距离塌方最近边界55 m,距离掌子面173 m。

隧道进口掌子面桩号K4+918,距离塌方边界93 m;塌方段相对位置关系见图4。

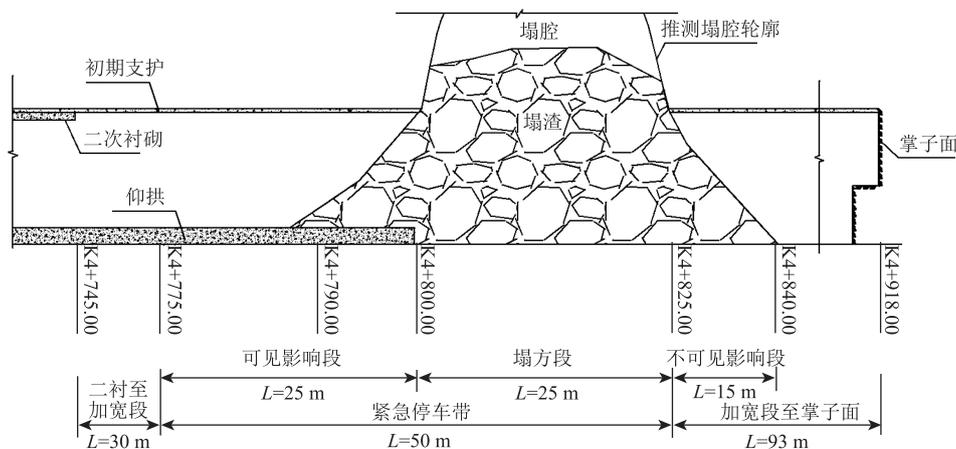


图4 塌方段相对位置关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relative position of collapse section

4 塌方原因分析

开挖揭示, 实际工程地质条件与原设计相符, 设计支护参数能满足实际需要。

《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)

7.2.3 规定: IV 级围岩开挖长度不大于 2 榀钢架间距; 实际施工超过了规定值; 设计文件要求上台阶开挖高度 4.55 m, 实际开挖高度 8.04 m。《隧道施工安全九条规定》2.3 规定: 石质隧道, IV 级围岩地段, 仰拱距离掌子面不大于 70 m, 实际为 118 m; 二次衬砌距离掌子面距离不大于 120 m, 实际为 173 m。另外, 根据 K4+775~K4+800 塌方影响段初期支护变形情况及现场打孔验证知, 隧道拱顶存在大量超挖脱空, 脱空部位岩面没有任何支护。

综合分析判断, 隧道塌方的主要原因是施工所致。采用大断面、大进尺开挖后, 隧道拱部出现大量超挖, 超挖部位没有及时采取有效的处理及支护; 隧道仰拱及二次衬砌严重滞后, 初支后至塌方时长达 56 d; 其次, 从 7 月 5 日发现初支喷混凝土局部开裂到 7 月 25 日塌方, 时间间隔 20 d, 在此期间, 现场仅在塌方段间隔施工了 8 榀临时钢架支护, 没有及时对钢架后脱空进行回填处理; 另外, 本段属于节理裂隙发育的 IV 级偏差泥质细砂岩夹黑色页岩。2020 年 7 月, 遭遇了罕见的强降雨, 隧道渗水增加, 泥岩软化, 超挖脱空部位围岩出现过大松弛变形。

在以上诸多因素的影响下, 远离掌子面 93~118 m 的位置形成“关门式”大塌方。

5 安全风险评估

根据实际围岩条件、施工情况、隧道拱部脱空情况、塌方段塌腔稳定情况及 K4+775~K4+800 段变形情况, 综合分析判断: K4+800~K4+825 塌方段塌腔欠稳定, 潜在掉块及塌方的较大安全风险; K4+775~K4+790 段潜在塌方的一般安全风险; K4+790~K4+800 段处于临界稳定状态, 潜在塌方的重大安全风险; 不可见塌方影响段洞径较小, 隧道拱部存在局部超挖脱空, 潜在塌方的一般安全隐患。

6 “三段四步法”塌方处治技术

隧道塌方后, 根据塌方段和可见塌方影响段潜在的安全风险, 分段制定了有针对性的安全处治技术方案, 并根据具体方案, 按分段施工的步骤和安全施工技术方法, 提出创新的“三段四步法”隧道塌方处治方案。

“三段四步法”释义, “三段”是指: 塌方段及其两端塌方影响段; “四步”是指: 第 1 步, 应急处理; 第 2 步, 可见塌方影响段加固处理; 第 3 步, 塌方段处理; 第 4 步, 不可见塌方影响段加固处理。

6.1 应急处理

紧靠 K4+800 附近, 在隧道开挖轮廓线内, 采用机械填渣反压塌口下部 K4+775~K4+800 段高风险塌方影响段两侧边墙; 在现有的塌渣坡面上填渣, 反压塌渣, 放缓塌渣坡面; 用装砂编织袋封堵隧道拱顶塌口。

边墙反压塌渣高度不低于 150 cm。反压填渣坡面不陡于 1:1, 并在隧道起拱线部位横向留宽度不小于 150 cm 的作业平台。

6.2 塌方影响段临时支护及加固措施

6.2.1 临时支护

K4+775~K4+790 段, 在现有拱、墙初支的基础上, 根据实际需要设置 I18 临时钢架支撑组, 按不少于 3 榀钢架联合为一组, 同组钢架纵向间距 100 cm。相邻钢架支撑组之间间隔距离 2~5 m。

K4+790~K4+800 段, 在拱、墙初支的基础上, 按纵向 100 cm 间距设 I18 工字钢架作为临时支撑。

在钢架内缘, 按环向 100 cm 间距布置 $\Phi 22$ 纵向连接筋; 每榀钢架设 6 根水泥砂浆锁脚锚杆 ($\Phi 22$, $L=350$ cm/根), 锚杆设置于每榀钢架的每个单元中部, 锚杆外露钢筋端部制作成 U 型弯钩与钢架帮焊连接牢固; 钢架与现有初支面紧贴, 不能密贴处采用 C20 混凝土预制块或木楔支垫后喷 C20 混凝土填缝密实。

填渣反压地段, 临时钢架应置于反压渣体上部。钢架底部置于填渣顶部, 采用大块石或片石支垫形成大脚支垫, 锁脚锚杆固定。

6.2.2 脱空回填及加固措施

6.2.2.1 隧道脱空检查及处理

采用开孔检查法或地质雷达检查法检查 K4+775~K4+800 段初支与开挖轮廓面之间是否存在脱空。根据脱空部位及脱空大小, 在较大脱空处设 $\Phi 108$ 混凝土泵送管, 泵送 C20 混凝土回填空腔。当空腔高度小于 1.5 m 时, 采用 C20 混凝土回填密实; 当空腔高度大于 1.5 m 时, 回填至拱顶以上 1.5 m。

6.2.2.2 注浆加固

可见塌方影响 K4+775~K4+800 段, 在隧道拱部 120° 范围内设径向注浆小导管 ($\Phi 42 \times 4$, $L=100$ cm/根), 环向及纵向间距 100 cm, 梅花型布置,

每根小导管平均注浆量 0.135 m^3 。自下向上，两侧对称注浆，注浆后在隧道开挖轮廓线外形成不小于 100 cm 厚的连续固结拱圈。

K4+795~K4+800 段，在拱部 120° 范围内的适当位置设 2 排环向及纵向间距 100 cm 、梅花型布置、超前向上 45° 大角度的固结注浆小导管 ($\Phi 42 \times 4$, $L=450 \text{ cm}$ /根)，每根小导管平均注浆量 0.203 m^3 。

小导管尾端 30 cm 不设注浆孔，前端按照纵向 10 cm 间距设 3 排直径为 $\Phi 8$ 的梅花型注浆孔。水泥浆强度不低于 M20，水灰比 $0.5:1 \sim 1:1$ ，限量注浆，注浆压力不作为终浆标准。参考注浆压力 $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。

6.2.3 不可见塌方影响段临时支护及加固措施

不可见塌方影响 K4+825~K4+840 段，待塌方段处理完毕后，根据实际情况进行相应加固处理，如有变形，参照 K4+775~K4+800 段加固处治方案处置。

6.3 拆除临时支护钢架

加固完毕，注水泥浆强度或泵送混凝土强度不低于设计 75% 强度要求，铺设防水板前，制定拆除临时支护钢架的作业指导书，按要求拆除临时支护钢架。

6.4 塌方影响段二次衬砌

择机实施二次衬砌。当塌方影响段加固工作完毕，消除了本段安全隐患，塌方段上半洞开挖、初

支完毕，不可见塌方段加固处理完毕后，再安排二次衬砌；当加固后，还潜在塌方的安全风险时，先实施本段衬砌，再考虑后续其他施工。

6.5 塌方段处治方案

6.5.1 方案比选

根据塌方情况、实际工程地质情况及塌方后已实施的应急处理措施，在确保安全的前提下，结合隧道使用功能，按经济合理的原则，提出 3 个隧道塌方处治比选方案。

方案 1：小导管注浆固结塌渣成拱法；

方案 2：开挖塌渣泵送混凝土回填成拱法；

方案 3：大管棚支护法。

经研究比选，确定方案 1 作为隧道塌方处治方案，见图 5、图 6。

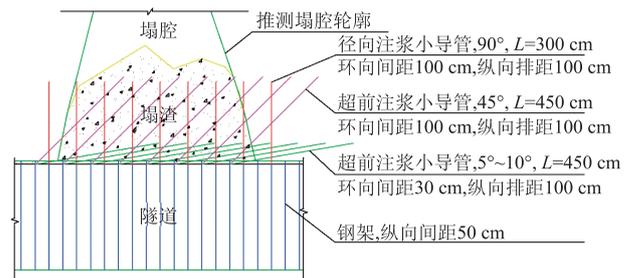


图 5 隧道塌方处治纵断面示意图
Fig. 5 Schematic diagram of longitudinal section of treatment of tunnel collapse

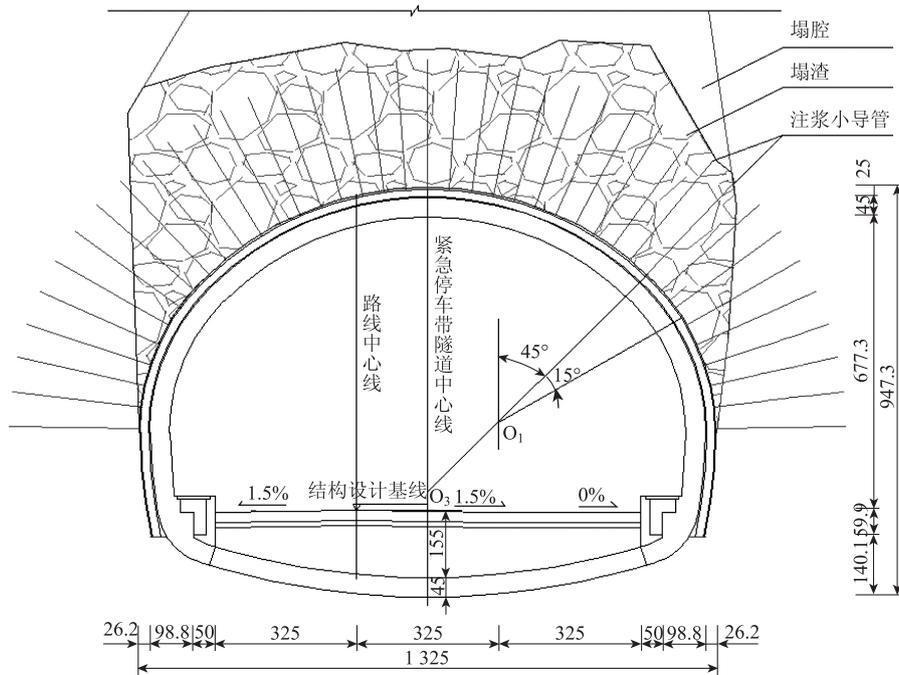


图 6 隧道塌方处治横断面示意图 (单位: cm)
Fig. 6 Schematic diagram of cross-section of treatment of tunnel collapse (unit: cm)

6.5.2 小导管注浆固结塌渣成拱方案

塌方段按照 $IV_{7.0}^T$ 型衬砌类型施工。局部支护参数调整如下:

隧道拱、墙范围内初支采用 I18 工字钢架, 间距 50 cm, 钢架间设 $\Phi 22$ 纵向连接筋, 环向间距 100 cm; 每榀钢架设 12 根水泥砂浆锁脚锚杆 ($\Phi 22$, $L=350$ cm/根)。

泵送 C20 混凝土回填塌腔: 在 K4+800~K4+802 段隧道拱顶 90° 范围内隧道开挖轮廓线外的无塌渣部位, 泵送 C20 混凝土回填塌腔至隧道拱顶开挖轮廓外以上 150 cm, 根据现状, 泵送混凝土紧贴现有塌渣及 K4+800 处塌腔岩体。

K4+802~K4+825 段, 采用不同角度的注浆小导管超前及补注浆固结加固隧道拱部塌渣, 使拱部一定厚度的塌渣形成钢筋混凝土碎石固结拱, 具体支护参数如下。

在拱部 120° 范围内设超前小角度注浆小导管 ($\Phi 42 \times 4$, $L=450$ cm/根), 环向间距 30 cm, 纵向排距 100 cm, 超前外插角 $5^\circ \sim 10^\circ$, 每根小导管平均注浆量 0.135 m^3 。

在隧道拱部 120° 范围内设超前大角度注浆小导管 ($\Phi 42 \times 4$, $L=450$ cm/根), 环向及纵向间距 100 cm, 超前向上外插角 45° 。每根小导管平均注浆量 0.473 m^3 。

在隧道拱部 120° 范围内设径向注浆小导管 ($\Phi 42 \times 4$, $L=300$ cm/根), 小导管环向及纵向间距 100 cm, 径向布置。每根小导管平均注浆量 0.473 m^3 。

超前大角度注浆小导管与径向注浆小导管纵向交替布置。按要求施工小导管注浆孔, 水泥浆强度不低于 M20, 水灰比 $0.5:1 \sim 1:1$, 限量注浆。依次对应施工超前小角度及大角度注浆小导管; 开挖及初期支护 150~200 cm 后, 及时跟进施工 1~2 排径向注浆小导管。

取消拱部 120° 范围内系统锚杆, 其余部位的系统锚杆按原设计 $IV_{7.0}^T$ 型衬砌支护参数施工 (见表 1)。在拱部两侧注浆加固塌渣与塌腔岩面接触的范围内, 纵向设置 2 排水平向外的水泥砂浆锚杆, 锚杆穿过塌渣, 锚入岩体, 入岩长度不小于 100 cm。锚杆型号: $\Phi 25$, $L=450$ cm/根, 环向间距 100 cm, 纵向间距 50 cm, 锚杆对应钢架位置设置, 锚杆外漏端与钢架采用 U 型钢筋满焊连接牢固。

6.6 开挖方法

塌方段分上、下台阶和仰拱 3 部分开挖。以拱

部 3 节钢架所在位置为上台阶 (高 4.36 m); 上台阶底部与边墙钢架底部之间为下台阶 (高 3.68 m); 仰拱 (高 1.40 m)。

先施工塌方段上台阶, 上台阶施工完毕后, 再施工下台阶。上台阶采用环形分部留核心土法开挖, 每循环开挖进尺按照能安装一榀钢架的距离控制。每循环可根据钢架接头分左、中、右 3 部分施工。先施工左侧一段钢架, 留中间核心土, 再施工右侧一段钢架, 然后完成拱顶的一段钢架。留核心土坡比 $1:1$, 开挖后, 喷 C20 混凝土厚 8 cm 封闭塌渣体坡面。依次循环, 完成上台阶开挖施工。采用钻孔取芯切割法或风镐破碎法开挖局部固结塌渣, 严禁放炮开挖。

根据塌方情况、塌方体加固情况及两侧边墙围岩状况确定下台阶开挖方法。当两侧边墙围岩较差, 上台阶塌方体加固后的拱座不稳固时, 中间留核心土, 两侧拉槽落底。落底前, 先行施工边墙超前外插 45° 大角度的超前固结注浆小导管或超前水泥砂浆锚杆, 然后按照 1~2 榀钢架距离作为单循环开挖进尺, 开挖后及时施工钢架及喷混凝土等初支。拉槽一侧超前另一侧不少于 5 m, 严禁同榀钢架两侧同步开挖悬空。适时清除中间核心土。采用拉槽的渣体反压支护好的边墙, 待喷混凝土达到强度要求后清除反压渣体。

下台阶施工完毕后, 适时施工仰拱。仰拱全幅最大开挖长度不宜超过 3 m。

6.7 塌方段排水

塌方处理完毕, 准备二次衬砌及铺设防水板前, 在塌方段拱部, 按照 2 m 间距施工直径不小于 50 cm 的径向排水孔, 排水孔长度以打穿塌渣体或固结圈, 达到引排塌渣体内积水的目的确定排水孔长度。

在拱、墙范围内, 沿初支面, 按照纵向 2 m 间距, 环向设置 $\Phi 50$ HDPE 单壁波纹盲管。每个排水孔内插 1 根 100 cm 长的 $\Phi 50$ PVC 排水管, 并通过三通与波纹盲管有效连接, 排水管与排水孔周壁可见部位抹水泥砂浆封堵, 引排塌腔水至隧道底部排水沟。然后在拱、墙范围内铺设 EVA 防水板, 施工二次衬砌。

6.8 二次衬砌

紧急停车带二次衬砌厚度不变, 加强二次衬砌钢筋 ($\Phi 22$ 环向主筋间距由 250 mm 变为 200 mm), 抗渗等级 P8, 其余参数按照 $IV_{7.0}^T$ 型衬砌不变 (见表 1)。

7 隧道塌方处治效果

7.1 监控量测情况

塌方处理后,于2020年12月12日—16日进行了K4+815处全断面监测,除12日拱顶3#点沉降值为6 mm/d外,其余时间沉降值在3 mm/d以内,监测情况正常(见图7)。

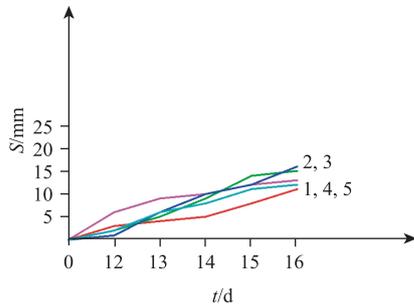


图7 K4+815 时间—位移曲线

Fig. 7 Time-displacement curve of K4+815

7.2 塌方处治效果

在受降雨影响和现场施工组织一般的条件下,按确定的方案安全地完成了隧道塌方处理工作。可见塌方影响段25 m,用时15 d;不可见塌方影响段15 m,用时10 d;塌方段25 m,用时30 d。合计55 d。隧道塌方处理及变形加固直接费约268万。

实践证明“三段四步法”隧道塌方处治方案安全有效,塌方处治效果良好。

8 结论与建议

按照“三段四步法”技术方法,安全有效地处治了王麻子隧道大塌方。总结几点体会并提出需要进一步研究的问题如下:

(1) 此隧道塌方的主要原因是施工不当所致。隧道拱部钢架与岩面之间脱空和脱空部位有效支护的缺失问题是一种普遍现象。这是隧道塌方安全风险管控的重点。

(2) “三段四步法”的分段评价方法和分步处治方法不仅适用于关门式隧道塌方,也适用于其他形式的隧道塌方。此法具有普遍适用性。

(3) 塌方段采用了3种不同角度和不同长度的注浆小导管。根据不同小导管所起的不同作用,对其施工顺序、施工方法、注浆量进行了区别对待。采用适当的注浆工艺,动态调整不同部位的注浆量,重视补注浆的效果和作用,实现在隧道拱部形成2~3 m厚连续钢筋混凝土碎石固结拱圈的目的。

(4) 要重视固结拱圈之拱座与两侧岩体之间的有效连接和塌渣体内的排水工作。

(5) 应急抢险中,根据需要优先使用机械填渣反压法。此法能快速约束隧道过大变形和预防塌方扩大。

(6) 有待进一步研究和完善问题有:注浆质量的检验标准;初期支护钢材的防腐及加固圈的耐久性等问题。

参考文献:

References:

- [1] 吴学智,张少辉,王建,等.某超大断面交通隧道塌方处理试验设计及施工技术研究[J].现代隧道技术,2016,53(4):148-154.
WU Xue-zhi, ZHANG Shao-hui, WANG Jian, et al. Test Design and Construction Techniques for the Collapse Treatment of a Tunnel with an Extra-large Section [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (4): 148-154.
- [2] 吴学智,王建,杨保全,等.某强倾侧变形体内浅埋偏压洞口段的隧道变形分析及处治技术研究[J].隧道建设,2015,35(7):721-726.
WU Xue-zhi, WANG Jian, YANG Bao-quan, et al. Analysis on Deformation of a Shallow-covered Asymmetrically-pressured Tunnel Portal Section Located in Toppling Deformed Ground and Its Treatment [J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (7): 721-726.
- [3] 刘智勇,尹登华,吴学智,等.某公路隧道塌方原因分析及处治技术[J].路基工程,2018(1):235-239.
LIU Zhi-yong, YIN Deng-hua, WU Xue-zhi, et al. Cause Analysis of a Highway Tunnel Collapse and the Treatment Technology [J]. Subgrade Engineering, 2018 (1): 235-239.
- [4] 罗治国,张智健,李勇森,等.富水软弱围岩隧道塌方机理及治理措施[J].河南科技大学学报(自然科学版),2021,42(2):59-64.
LUO Zhi-guo, ZHANG Zhi-jian, LI Yong-sen, et al. Collapse Mechanism and Treatment Measures of Water-rich and Weak Surrounding Rock Tunnels [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42 (2): 59-64.
- [5] 任和祥.高海拔寒冷地区软岩公路隧道塌方处置方案研究[J].公路工程,2020,45(1):212-216.
REN He-xiang. Study on Disposal Scheme of Soft Rock Highway Tunnel Collapse in High Altitude and Cold Area [J]. Highway Engineering, 2020, 45 (1): 212-216.

- [6] 杨林,江鸿,陈培师,等. 浅埋大断面公路隧道塌方处治措施及效果分析 [J]. 现代隧道技术, 2020, 45 (1): 207-213.
YANG Lin, JIANG Hong, CHEN Pei-shi, et al. Treatment Measures for Collapses of the Shallow-buried Highway Tunnel with Large Cross-section and Its Effects Analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 45 (1): 207-213.
- [7] 剧仲林. 隧道“关门”塌方原因的力学分析及预防对策 [J]. 隧道建设, 2018, 38 (1): 20-27.
JU Zhong-lin. Mechanical Analysis and Prevention Measures for “Closed” Collapse of Tunnel and Its Countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (1): 20-27.
- [8] 袁永才,李术才,李利平,等. 山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47 (7): 2406-2414.
YUAN Yong-cai, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Risk Evaluation Theory and Method of Collapse in Mountain Tunnel and Its Engineering Applications [J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2016, 47 (7): 2406-2414.
- [9] 肖东辉,孟亚锋,孔德坤,等. T76S自进式螺旋注浆管棚在隧道塌方治理中的应用及支护效果评价 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (6): 214-217.
XIAO Dong-hui, MENG Ya-feng, KONG De-kun, et al. Application of T76S Self-drilling and Grouting Spiral Pipe-roof in Tunnel Collapse Treatment and Evaluation on Support Effect [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (6): 214-217.
- [10] 关晓吉. 基于可拓联系云模型的隧道塌方风险等级评价方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14 (11): 186-192.
GUAN Xiao-ji. Evaluation Method on Risk Grade of Tunnel Collapse Based on Extension Connection Cloud Model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14 (11): 186-192.
- [11] 吕擎峰,霍振升,赵本海,等. 基于模糊层次和后果当量法的隧道塌方风险评估 [J]. 隧道建设, 2018, 38 (2): 31-38.
LÜ Qing-feng, HUO Zhen-sheng, ZHAO Ben-hai, et al. Risk Assessment of Tunnel Collapse Based on Fuzzy Hierarchy and Consequences Equivalent Method [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (2): 31-38.
- [12] 祁文睿,高永涛. 公路隧道穿越软弱破碎围岩综合施工及监测技术研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (11): 88-96.
QI Wen-rui, GAO Yong-tao. Study on Study on Comprehensive Construction and Monitoring Technology of Highway Tunnel Crossing Weak and Fractured Surrounding Rock [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (11): 88-96.
- [13] 张晓今,钟毫忠,张超. 浅埋山岭隧道软岩段塌方原因分析及处理技术 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (2): 201-207.
ZHANG Xiao-jin, ZHONG Hao-zhong, ZHANG Chao. Cause Analysis and Treatment Measures of a Collapse Event for a Shallow-buried Mountain Tunnel in Soft Rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (2): 201-207.
- [14] 王秋生,董竹勤,李鹏飞,等. 深埋大断面隧道土石复合地层塌方机制及处置措施评价 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39 (1): 59-65.
WANG Qiu-sheng, DONG Zhu-qin, LI Peng-fei, et al. Collapse Mechanism and Treatment Measure Assessment for Deep Tunnel with Large Cross Section in Soil-stone Composite Strata [J]. China Railway Science, 2018, 39 (1): 59-65.
- [15] 侯艳娟,张顶立,李奥. 隧道施工塌方事故分析与控制 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (1): 45-51.
HOU Yan-juan, ZHANG Ding-li, LI Ao. Analysis and Control of Collapse Events during Tunnel Construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (1): 45-51.
- [16] 张毅,折学森,李楠. 弱膨胀土地区隧道施工方法及塌方研究 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (10): 82-91.
ZHANG Yi, SHE Xue-sen, LI Nan. Study on Tunnel Construction Scheme in Weak-expansive Soil Area and Reason of Collapse [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (10): 82-91.
- [17] 李志强,杨涛. 浅埋黏土层大跨度隧道施工技术 with 塌方风险分析 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (2): 116-122.
LI Zhi-qiang, YANG Tao. Construction Technology of Large-span Tunnel in Shallow Clay Stratum and Collapse Risk Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (2): 116-122.
- [18] 李祝龙,李鹏飞,梁养辉,等. 波纹钢管用作隧道逃生管道时的模拟分析 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (8): 105-113.
LI Zhu-long, LI Peng-fei, LIANG Yang-hui, et al. Simulation Analysis of Corrugated Steel Pipe Used as Tunnel Escape Pipe [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (8): 105-113.