

自重湿陷性黄土场地地裂缝地铁暗挖隧道涌泥 灾害处理与风险控制

胡自全¹ 沙 鸣¹ 胡银林²

(1. 西安市轨道交通集团有限公司, 710018, 西安; 2. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 312099, 绍兴)

摘 要 [目的] 黄土饱和湿陷可能出现地下空洞。暗挖隧道穿过自重湿陷性黄土场地地裂缝设防段时, 若遇到地下空洞, 易引发涌泥灾害, 需采取有效的处理措施, 以控制施工风险。[方法] 以我国某穿越地裂缝的浅埋暗挖法地铁隧道为例, 介绍了该工程的概况及地质情况, 以及发生涌泥灾害的概要。地质勘察查明地铁右线隧道上方地裂缝破碎带存在黄土空洞, 根据该空洞的地层特性及涌泥风险特征, 采取了挂网喷射混凝土、小导管注浆固结、型钢及支撑加固、注浆回填空洞等施工措施。在此基础上, 进一步阐述了隧道涌泥体清理、隧道二次开挖过程的风险控制措施。[结果及结论] 案例工程涌泥灾害的处理措施, 以及隧道涌泥体清理、隧道二次开挖过程的风险控制措施是可行、安全的。措施实施后, 快速控制了险情, 确保了周边建筑物安全。

关键词 地铁暗挖隧道; 湿陷性黄土; 地裂缝; 涌泥灾害; 风险控制

中图分类号 U455.49; U456.3+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.044

Treatment of Mud Inrush Disasters and Risk Control for Underground-excavated Metro Tunnel in Self-weighty Saturated Slump Loess Ground Fissure

HU Ziquan¹, SHA Ming¹, HU Yinlin²

(1. Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710018, Xi'an, China; 2. Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd., 312099, Shaoxing, China)

Abstract [Objective] Saturated loess slump may lead to underground cavity. When the underground tunnel passes through the fortified fissures section of the self-weighty saturated slump loess site, the encountered underground cavity may likely bring about mud in-rush disaster. Effective treatment measures need be taken to control the construction risks.

[Method] With the project of a shallow-buried underground-excavated tunnel passing through the ground fissure in a place of China as example, the overview and geological situation of the project is introduced and the mud inrush disaster is summarized. Geological exploration finds that there is a loess cavity

in the ground fissure fracture zone above the right metro line of the tunnel. According to the stratum characteristics of the cavity and the mud inrush risk features, construction measures such as spraying concrete on hanged net, small pipe grouting consolidation, steel and support reinforcement, and grouting back-filling of the cavity are taken. Based on this, the risk control measures for the cleaning of tunnel mud inrush and the secondary excavation process of the tunnel are further elaborated. [Result & Conclusion] The treatment measures for the mud inrush disaster in the above project and the risk control measures for the cleaning of mud inrush and the tunnel secondary excavation process are feasible and safe. With the measures being taken, the danger is shortly under control, ensuring the safety of the surrounding buildings.

Key words underground-excavated metro tunnel; saturated slump loess; ground fissure; mud inrush disaster; risk control

地裂缝是黄土地区隧道建设的最大挑战之一^[1-2]。隧道地裂缝设防段常常伴随湿陷性黄土、饱和软黄土等不良地质问题, 极易造成地面沉陷、隧道内土方塌落、涌水及涌泥等地质灾害。封闭临时仰拱支撑、对掌子面进行回填反压, 并辅以降水施工, 是黄土地区处理此类灾害的常规做法。相对于常规“地层预加固+降排水”的解决方案, 本文以我国某穿越地裂缝的浅埋暗挖法地铁隧道为例, 该工程采用土体全断面注浆的方法, 避免了降水带来的土体固结沉降, 地层的加固效果更佳。待加固地层性能稳定后, 后续隧道开挖、支护及支撑体系等施工过程不需要在掌子面上开孔, 施工便捷、工序转换快、安全系数高。

1 工程概况

1.1 工程概述

案例工程为穿越地裂缝的浅埋暗挖法地铁隧道。该隧道采用全断面注浆加固土体, 暗挖隧道断

面尺寸为 9 035 mm(高)×9 000 mm(宽),分左线、右线 2 个隧道,左、右线的间距约为 25 m。该隧道采用 CRD 法(交叉中隔壁法)开挖,分 4 个导洞开挖支护,上下台阶错开 4~5 m,左右侧导坑错开 4~5 m。临时支护均采用 I20a 工字钢,在支护的两端焊接厚度为 10 mm 的钢板,并采用 M20 螺栓与正洞钢架连接。工字钢之间焊接连接筋,并将挂网喷射厚度为 250 mm 的 C25 混凝土作为初期支护(以下简称“初支”)。初支拱架每侧拱脚设 2 根 ϕ 42 mm 的锁脚锚管,锚管长度均为 4.0 m。

为确保施工安全,地裂缝暗挖隧道采用全断面注浆法加固土体,以阻止地下水进入隧道,增强开挖土体的强度。沿隧道纵向每隔 10 m 进行一次注浆,注浆范围为开挖线外 3 m,注浆孔间距按 0.6 m 布置。1 个注浆开挖段的开挖长度为 8 m,预留 2 m 止浆墙,采用 0.3 m 厚的 C25 挂网喷射混凝土。

1.2 工程地质情况

该地裂缝呈东北走向,倾向西南,倾角约为 80°,暗挖隧道穿越地裂缝处地下水为第四系松散层孔隙潜水,埋深为 10.70~29.80 m。地裂缝上盘地下水位约为 20.5 m,上盘水位与下盘水位的高差约为 6.0~10.0 m。隧道上部地层主要为<4-1>老黄土(埋深为 16.9~27.0 m)、<3-2>古土壤(埋深为 12.1~16.9 m)、<3-1>新黄土(埋深为 0.6~12.1 m),即:隧道上部地层均为 IV 级自重湿陷性黄土场地。隧道开挖过程中出现涌泥情况,涌泥位于此地裂缝穿越区间隧道上盘,水位位于隧道拱顶上方约 8.0~10.0 m。

经查询勘察资料,该地裂缝上下盘长期存在约 7.0 m 的水位差,其主要原因有 2 个:一是地裂缝变形带具有一定的隔水能力;二是地裂缝下盘附近受建筑基坑降水及民用井影响。

2 暗挖隧道穿越地裂缝引发涌泥灾害的处理措施

2.1 涌泥情况概要

在暗挖隧道 CRD 法开挖右上导洞及进行支护的过程中,掌子面左上角出现了土体剥离。2020 年 8 月 31 日 22:00,掌子面挂网时隧道拱顶位置部分泥浆涌出,作业人员随即撤出。23:10,隧道发生第 1 次涌泥,涌泥量约为 30 m³,涌泥处距离掌子面约 5 m;次日 01:30,隧道发生第 2 次涌泥,涌泥量约为 120 m³,涌泥处距离掌子面约 15 m;次日 03:00,隧

道发生第 3 次涌泥,涌泥量约为 198 m³,涌泥处距离掌子面约 30 m。3 次涌泥量总计约 348 m³。涌泥导洞及涌泥坍塌体终点的位置如图 1 所示。

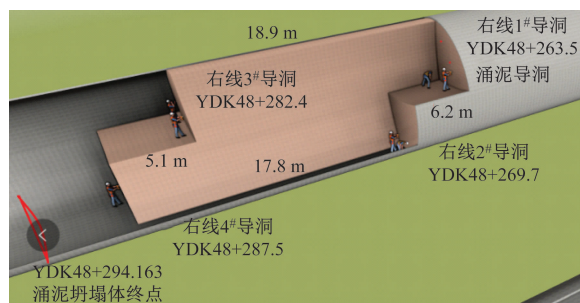


图 1 涌泥导洞及涌泥坍塌体终点的位置

Fig. 1 Location of the inrush mud guide hole and the end position of the inrush mud collapse body

发生涌泥事故后,施工方立即采取了封堵措施,以控制涌泥继续进入隧道。为确保人员安全,快速撤离了隧道上方居民小区的住户,并加强监测巡视,保证抢险作业安全。施工方确定采用洞内封堵加固、地面钻孔查找空洞的“两步走”措施,并快速组织落实。此外,施工方还对涌泥段隧道周边建筑物/构筑物、管线等进行了详细调查。

2.2 地下空洞探测及隧道涌泥原因分析

通过调查涌泥段周边管线情况,基于隧道洞内渗水、自来水、雨污水等取样检测,得到了水的硬度、氮的质量分数、磷的质量分数等检测结果并进行比对,排除了因管线破损造成涌泥的可能性。涌泥处隧道埋深为 28 m,地下水位在 20 m,隧道上部地层为老黄土、古土壤及新黄土,属 IV 级自重湿陷性场地。进一步在隧道上方居民小区 1 号楼(4 层混凝土建筑)南北两侧采用 3 组钻机完成了 14 个孔位(ZK1—ZK14)的钻探,各孔位的深度为 22.0~29.0 m,地下空洞探测平面图如图 2 所示。钻探发现,地下空洞及湿软土层主要位于 ZK2、ZK3、ZK4、

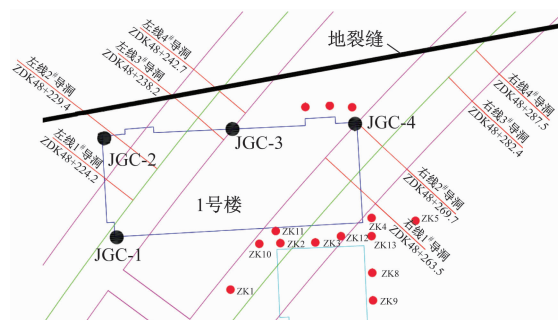


图 2 地下空洞探测平面图

Fig. 2 Plan of the underground cavity detection

ZK6,相邻的 ZK1、ZK7、ZK5、ZK8 未见明显流塑状土层,但地下 8~11 m 及 24~28 m 深度处的土层含水量较大。

根据探测资料,地铁右线(以下简称“右线”)隧道涌泥段掌子面位于水位线下方 6~8 m,右线隧道上方地裂缝破碎带上盘一侧存在黄土空洞。探明的软弱地层及空洞对应区域为 1 号楼下方。该地下空洞长度约 16.0 m,宽度约 6.6 m,埋深为 16.5~24.0 m,高度为 1.5~5.7 m,与右线隧道顶部的距离为 2.8~5.2 m。

该地下空洞的形成原因主要为地裂缝破碎带黄土受剪切、浸水等作用导致原生结构破坏,地层发生破损变化^[3-4]。此外,2018 年以来,该地区降雨量偏多,在强降水下渗产生的水动力作用下,老黄土地层逐步扩展形成黄土暗穴,黄土湿陷形成软弱地层及地下空洞。右线隧道开挖至该地下空洞下方时,老黄土地层孔洞中的软弱泥土涌入隧道。

2.3 隧道封闭及地下空洞回填

2.3.1 隧道内掌子面封闭,建立支撑体系

为控制险情,涌泥体稳定后针对 1[#]导洞(其位置见图 1)涌出土体坡脚的情况,施工方采用表面挂网喷射混凝土、小导管注浆措施,用以固结坡面及涌出土体。注浆完成后,使用型钢+格栅拱架对坡面进行加固。采取型钢+格栅拱架、网片封堵喷射混凝土等措施,封闭 2[#]导洞、3[#]导洞、4[#]导洞的掌子面,型钢、格栅拱架与既有初支结构焊接,防止注浆加固过程中型钢受力脱落。在 2[#]导洞内满堂架设脚手架及原木支撑,以加固临时仰拱,防止隧道初支结构破坏。涌泥后封闭掌子面及架设支撑体系施工现场如图 3 所示。

此外,施工方还利用已开挖地铁左线(以下简称“左线”)隧道向右线掌子面前方压注水泥浆(注浆压力控制在 0.6 MPa 以内),以进一步加固掌子面前方及上方的土体,防止上方软弱土体再次涌入隧道。

2.3.2 地下空洞填充处理

为控制地面塌陷及建筑物坍塌,勘察工作完成后,立即采用水泥砂浆灌注+补充注浆的方式,对地下空洞进行填充。利用 ZK2、ZK3 作为灌注孔,对地下空洞进行水泥砂浆填充,在灌注孔周围 5 m 范围内设置排气孔。ZK2 孔深为 24 m,有效灌浆段长度为 16~23 m,灌浆量为 60.0 m³;ZK3 的孔深为



a) 1[#]导洞内封堵掌子面



b) 2[#]导洞内架设满堂支架

图 3 涌泥后掌子面封闭及架设支撑体系现场图

Fig. 3 Onsite pictures of the closed tunnel face after soil inrush and the support system setting-up

24 m,有效灌浆段长度为 18~23 m,灌浆量为 142.0 m³。这 2 个孔位的累计注浆量为 202.0 m³,直至砂浆无溢出,结束灌浆。

为控制 1 号楼的不均匀沉降,在水泥砂浆灌注结束后,对砂浆灌注完成后的重点部位进行注浆填充,注浆范围为房屋基面以下 14~24 m。浆液选用双液浆,水灰比为 1:0.75,水泥浆与硅酸钠的体积比为 1:1,注浆压力为 0.5~1.0 MPa。整个注浆过程的累计注浆量为 512.7 m³。

2.4 周边建筑物/构筑物的安全监测

隧道涌泥处周边存在 4 栋多层建筑。经现场巡查,这些建筑物均未出现基础及结构开裂情况。1 号楼位于右线隧道 1[#]导洞正上方,存在不均匀沉降。险情发生后,1 号楼基础破坏风险较大。设置 4 个测点(其位置见图 2),其中:测点 JGC-1、JGC-2 位于 1 号楼西侧;测点 JGC-4 位于 1 号楼东侧;测点 JGC-3 位于 1 号楼北侧,且在测点 JGC-2 和测点 JGC-3 之间。2020 年 8 月 31 日至 9 月 8 日,1 号楼 4 个测点的沉降时程曲线如图 4 所示。由图 4 可知:1 号楼西侧的沉降较稳定,东侧的沉降较大;测点 JGC-4 的累计沉降量为 53 mm,平均沉降速率为 4 mm/d。

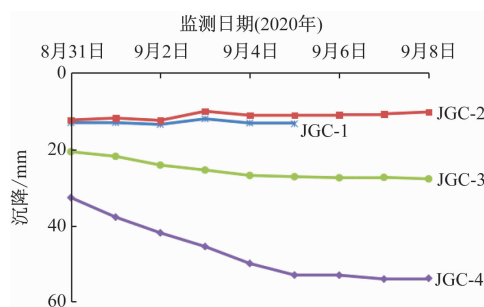


图 4 1 号楼 4 个测点的沉降时程曲线

Fig. 4 Time history curves of the settlement at the four measuring points in Building 1

3 隧道涌泥体清理及开挖支护风险控制

在进行右线隧道涌泥体清理前,先进行超前地质勘探。将原设计方案中水平探孔长度 3 m 调整为 10 m,探孔搭接长度为 3 m,有效勘探长度为 7 m。

涌泥清理采用人工开挖。为控制地层沉降,对涌出土体进行全断面超前预注浆加固后,清理作业由上而下分段推进至掌子面,以确保掌子面前方土体的稳定。注浆加固后,须保证涌泥土体无渗水^[5]。隧道施工范围内土体极限抗压强度不得小于 1.0 MPa,渗透系数应小于 1×10^{-6} cm/s。

3.1 1[#]导洞涌泥清理

3.1.1 从左线向右线注浆加固土质湿软区域

从左线向右线进行辐射状注浆加固,加固区域包括:环向范围为初支开挖线以外 5 m;纵向范围为 2[#]导洞掌子面前方 15 m。浆液采用体积比为 1:1 的水泥-硅酸钠双液浆,注浆孔间距为 0.8 m,注浆压力为 0.4 ~ 1.0 MPa。自大里程端向小里程端进行

注浆,注浆点位剖面图如图 5 所示。

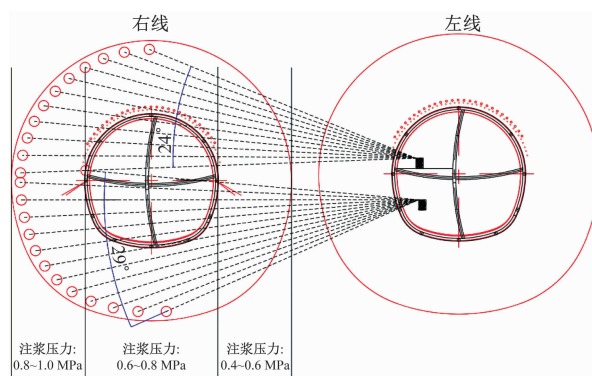


图 5 注浆点位剖面布置图

Fig. 5 Grouting points profile layout

3.1.2 1[#]导洞涌泥清理措施

在 1[#]导洞涌泥体内埋设注浆管,注浆管直径为 42 mm,长度为 5 m,按间距 1 m 呈梅花形布置。浆液类型为水泥砂浆,注浆压力控制在 0.3 MPa 左右。1[#]导洞内分上、下两层开挖,上层高度为 2.00 m,下层高度为 2.08 m。自上而下每次开挖进尺均为 1 m,上下交替逐步推进。

3.1.3 更换 1[#]导洞内变形的临时仰拱

涌泥清理过程中,须更换 1[#]导洞严重变形及被破坏的临时仰拱。将原受损临时仰拱支撑拆除后,替换为新的拱架,整改更换过程按“拆除 1 根、置换 1 根”的步序循环进行。使用螺栓连接临时仰拱与初支拱架,连接板四周采用焊接满焊。临时仰拱与初支拱架连接工艺如图 6 所示。

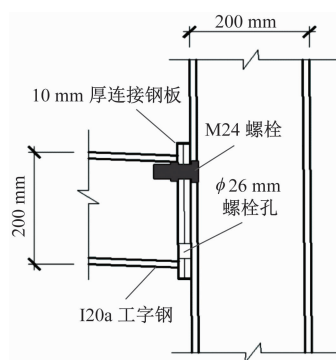


图 6 临时仰拱与初支拱架连接工艺

Fig. 6 Connection technique of the temporary inverted arch and the primary arch frame

3.2 3[#]导洞、4[#]导洞加固

1[#]导洞、3[#]导洞掌子面间距为 18.9 m。根据以往施工经验,分导洞注浆对成形隧道中隔壁受力变形影响较大。为避免因 3[#]导洞注浆导致 1[#]导洞内

中隔壁及初支结构受力变形过大,用2道I20工字钢对1[#]导洞纵向18.9 m范围内的初支进行加固。支撑端头设置I28槽钢系梁,支撑纵向间距为1 m,将支撑与系梁牢固焊接。1[#]导洞支撑加固示意图如图7所示。

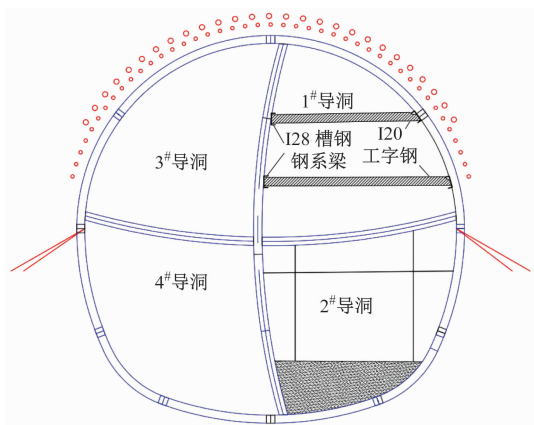


图7 1[#]导洞支撑加固示意图

Fig. 7 Support reinforcement diagram of 1[#] pilot tunnel

支撑施工完成后,由1[#]导洞向3[#]导洞方向注浆,以加固土体。注浆的纵向范围为YDK48+282.4—YDK48+263.5,横向范围为初支开挖线以外8 m。图8为3[#]导洞注浆加固截面图。浆液采用体积比为1:1的水泥-硅酸钠双液浆,从大里程端向小里程端注浆,注浆间距为1 m,注浆压力约为1.5 MPa。

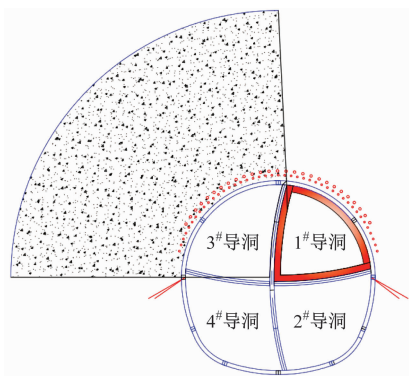


图8 3[#]导洞注浆加固截面图

Fig. 8 Cross section of 3[#] pilot tunnel grouting reinforcement

对右线里程YDK48+263.5—YDK48+282.4范围内的3[#]导洞、4[#]导洞内前方及左侧土体进行加固,加固压力为0.8~1.0 MPa。图9为3[#]导洞、4[#]导洞外轮廓注浆加固剖面示意图。土体加固完成后,按原设计CRD工法开挖3[#]导洞、4[#]导洞至2[#]导洞位置(里程为YDK48+269.7)后,封闭3[#]导洞、4[#]

导洞掌子面。待3[#]导洞、4[#]导洞掌子面封闭完成后,逐榀拆除2[#]导洞内满堂支架及圆木支撑。

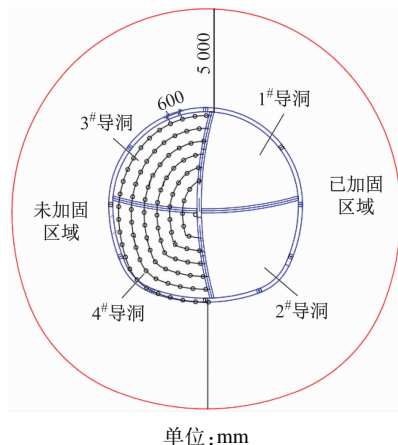


图9 3[#]导洞、4[#]导洞外轮廓注浆加固剖面示意图

Fig. 9 Schematic profile of 3[#] and 4[#] pilot tunnels outer contour grouting reinforcement

3.3 右线隧道YDK48+269.7前方30 m开挖支护

右线隧道自YDK48+269.7位置处开始采用原设计的CRD工法进行开挖。开挖前,在1[#]导洞拱部设置 $\phi 89$ mm管棚。图10为1[#]导洞管棚设置示意图,管棚间距为0.4 m,长度为5 m,搭接长度为2 m。隧道开挖至YDK48+259.7处时,进行第2次循环注浆加固。将超前地质钻探长度和地层加固长度调整为15 m,开挖长度为10 m,注浆孔间距为0.6 m,加固范围为隧道初支开挖线以外5 m。

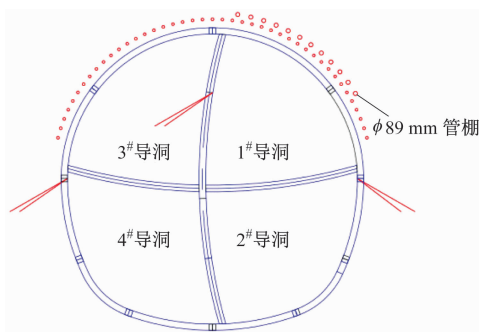


图10 1[#]导洞管棚设置示意图

Fig. 10 Setting diagram of 1[#] pilot tunnel pipe shed

3.4 监测数据分析

根据设计文件和现场实际施工情况,重新进行开挖施工的危险源辨识。确定淤泥清理开挖风险的危险级别为Ⅲ级,下穿建筑物暗挖施工的危险级别为Ⅱ级。施工期间最重要的工作是确保1号楼的安全。对2020年9月1日至12月30日1号楼的沉降进行监测,图11为监测得到的1号楼3个测点的沉降时程曲线图。

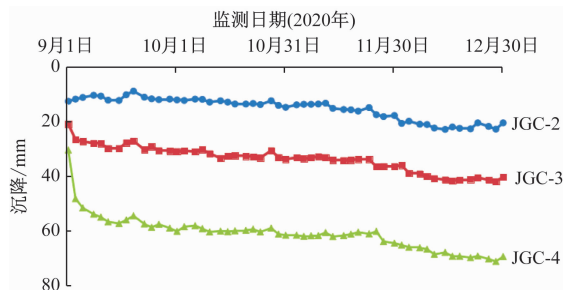


图 11 1 号楼 3 个测点的沉降时程曲线

Fig. 11 Time history curves of the settlement at three measuring points in Building 1

由图 11 可知:2020 年 9 月 5 日,险情处置完成后,3 个监测点仍有沉降,但沉降速度已开始趋缓;2020 年 9 月 17 日,在左线向右线注浆期间,3 个监测点的土体有 2~3 mm 的抬升,后沉降逐步趋于收敛。2020 年 11 月 25 日至 12 月 15 日,涌泥体清理完成、隧道第 1 次循环开挖期间,1 号楼再次出现下沉趋势。2020 年 12 月 30 日,1 号楼的沉降区域收敛。后续隧道开挖期间 1 号楼的沉降量为 10.0 mm,整个隧道施工期间 1 号楼最大沉降点 JGC-4 的累计沉降量为 69.3 mm。开挖过程中,未发现建筑物基础及结构出现破坏。

在隧道开挖期间,选取了 YDK48+255、YDK48+265、YDK48+275、YDK48+285、YDK48+295 共计 5 处里程点作为监测断面,对右线拱顶的沉降进行监测。图 12 为右线隧道 5 个监测断面的拱顶沉降时程曲线。由图 12 可知:YDK48+265 和 YDK48+275 处的拱顶沉降最大;2020 年 10 月 16 日,YDK48+285 处拱顶沉降加大,其原因为开挖过程中机械设备及材料物资堆积导致荷载增加,移除相关物资后,该处拱顶有向上隆起趋势。涌泥清理、受力体系转换及隧道开挖过程中,这 5 个断面均未出现初支开裂、涌水、涌泥等现象。

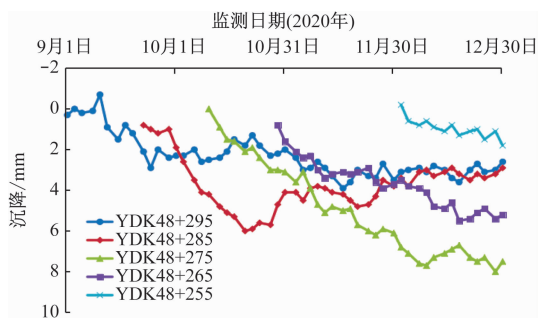


图 12 右线隧道 5 个监测断面的拱顶沉降时程曲线

Fig. 12 Time history curves of arch settlement at 5 monitoring sections inside the right line tunnel

4 结语

针对案例工程的涌泥灾害,本文及时探明了隧道上方空洞,采用了坡脚挂网喷射混凝土、小导管注浆固结、型钢及支撑加固初支等措施,并进行注浆回填,从而快速控制了险情,确保了周边建筑物安全。

1) 对涌出土体及隧道轮廓线外土体进行注浆加固,然后再进行隧道开挖,并根据不同导洞的开挖顺序进行隧道内支撑体系转换,防止涌泥清理及隧道开挖过程中出现二次突涌、坍塌,有效控制了地面及建筑物沉降。

2) 在地下孔洞注浆回填、涌出土体和地层土体的注浆加固、开挖过程中,均须及时对建筑物沉降、地面沉降、隧道拱顶沉降等进行监测,结合监测数据优化注浆参数和开挖方案。

3) 在探明暗挖段隧道内具有湿陷性黄土、饱和软黄土等不良地质问题地裂缝后,应先采用全断面注浆法加固地层土体,再进行隧道开挖,以防止出现涌泥、涌水或地面塌陷。地层加固注浆应配合超前地质钻探进行,做到风险精准防控。加固范围建议扩充至隧道轮廓线以外 4~5 m,止浆墙厚度应大于 3 m。

参考文献

- [1] 陈东山,王鸣晓. 西安地铁土建工程设计与施工[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2017.
CHEN Dongshan, WANG Mingxiao. Civil engineering design and construction of Xi'an metro[M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 2017.
- [2] 宋扬,马钢. 西安城市轨道交通施工关键技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
SONG Yang, MA Gang. Key technologies of Xi'an urban rail transit construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2022.
- [3] 张晓宇,毕焕军,曹峰,等. 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 41.
ZHANG Xiaoyu, BI Huanjun, CAO Feng, et al. Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 41.
- [4] 邵帅,邵生俊,朱丹丹,等. 黄土的微观结构演变与宏观结构性变化规律[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊1): 64.

(下转第 259 页)

后,可降低高负载下辅助变流器内部各部件的温升,方案四具有可行性。

表6 方案四实施前后辅助变流器内部各部件温升对比结果
Tab.6 Comparison results of temperature rise devices inside the auxiliary converter before and after implementation of Scheme 4

测量位置	实施前 低负载下 各部件温 升/K	实施前 高负载下 各部件温 升/K	实施后 高负载下 各部件温 升/K	各部件 设计温升 限值/K
变压器 1	42.0	70.0	51.1	105.0
变压器 2	41.5	63.8	52.5	105.0
电抗器 1	45.6	78.3	58.8	135.0
电抗器 2	49.5	72.5	55.9	135.0
电抗器 3	51.8	68.8	51.8	135.0
DC/DC 模块散热器	22.2	39.6	39.2	45.0
充电机模块散热器	10.5	21.9	13.2	45.0
逆变模块散热器	9.6	23.1	17.2	45.0
模块腔室	5.3	25.1	14.7	45.0

5 结语

本文为解决高温高湿环境下地铁列车辅助变流器主要元器件 IGBT 故障率偏高的问题,提出了调整风机调速电压、调整内循环风机方向、提高柜体密封性、优化冷却风扇控制逻辑 4 个优化方案,并对 4 号线全线列车的辅助变流器进行优化。

2022 年 12 月,对 4 号线全部列车的优化工作全部完成。列车设备优化完成后至今已累计运行 1 年多,尚未有同类故障再次发生。试验台测试结果和现场实施跟踪效果表明:本文提出针对高温高湿环境下辅助变流器的优化方案具有有效性和可操

作性,建议予以推广应用。

参考文献

- [1] 窦攀烽,左舒翟,任引,等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2398.
DOU Panfeng, ZUO Shudi, REN Yin, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2398.
- [2] 裴文超,杨树松,蒋晓东,等. 采用并网供电和高频变流技术的宁波轨道交通车辆辅助供电系统[J]. 机车电传动, 2020(3): 73.
QIU Wenchao, YANG Shusong, JIANG Xiaodong, et al. Auxiliary power supply system with grid connected power supply and high frequency converter technology of Ningbo rail transit vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 73.
- [3] 于青松. 下一代地铁列车节能型牵引及辅助变流系统[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 128.
YU Qingsong. Energy-saving traction converter system for next generation metro train [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 128.
- [4] 刘博阳,刘伟志,杨宁. 地铁辅助变流器功率损耗与热仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(4): 72.
LIU Boyang, LIU Weizhi, YANG Ning. Power loss and thermal simulation analysis of auxiliary converter for metro vehicle [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(4): 72.

· 收稿日期:2023-12-18 修回日期:2024-02-19 出版日期:2024-09-10
Received:2023-12-18 Revised:2024-02-19 Published:2024-09-10
· 通信作者:黄慧建,高级工程师,171348912@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 254 页)

- SHAO Shuai, SHAO Shengjun, ZHU Dandan, et al. Microstructure evolution and macro-structural change law of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 64.
- [5] 薛晓辉,张军,宿钟鸣,等. 富水黄土隧道注浆加固机制及效果评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 34.
XUE Xiaohui, ZHANG Jun, SU Zhongming, et al. Grouting pre-reinforcement mechanism and effect evaluation in water-rich loess tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sci-

ence), 2015, 34(4): 34.

· 收稿日期:2022-05-05 修回日期:2022-06-13 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-05 Revised:2022-06-13 Published:2024-09-10
· 第一作者:胡自全,高级工程师,287113131@qq.com
通信作者:沙鸣,高级工程师,38997629@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license