

周家窰黄土隧道冒顶塌方分析与处治技术

赵兵¹, 许立¹, 张栋², 王双现¹, 李翼延³

(1. 三门峡市国道310南移项目公司, 河南 三门峡 472000; 2. 河南省三门峡市公路局; 3. 中南大学 土木工程学院)

摘要:三门峡市国道310南移工程周家窰隧道为分离式黄土隧道, 采用短台阶法施工。左线隧道于剩余30 m贯通时, 靠近进口一侧掌子面发生塌方, 形成埋深70 m条件下的冒顶, 地表呈现直约径12 m、深8.5 m的近似圆形陷坑。该文对项目塌方特征及成因进行分析, 认为黄土地层竖向节理发育, 节理切割形成竖向软弱面是导致埋深较大时隧道仍通顶塌方的主要原因。进一步提出塌方处注浆回填封闭, 另一端在大管棚及径向注浆加固下单向掘进, 地表陷坑分层回填的综合处治方案, 现场实施后处治效果良好且隧道安全顺利贯通。

关键词:大断面黄土隧道; 塌方处治; 大管棚加固; 径向注浆; 地表塌陷

黄土是中国工程建设中常遇的一类特殊土, 具有明显的竖向节理结构特性。黄土隧道建设过程中, 竖向节理及软弱面易导致地面沉降、支护结构大变形乃至塌方问题, 引发施工安全风险, 迟滞施工进度、增加工程造价。

近年来, 黄土隧道建设如火如荼, 施工期间围岩失稳破坏机制以及塌方预防等方面的研究成果丰硕。赖金星等分析某浅埋偏压黄土隧道洞口段塌方原因, 提出了超前大管棚联合注浆小导管加固方案, 对处治效果进行了现场实测及计算评价; 赵虎生分析了梨树塔湿软黄土隧道塌方特征及成因, 采用地表旋喷桩加固进行塌方处理取得了良好效果; 徐松芳等分析了大管棚在黄土隧道塌方处理中的应用效果, 通过数值计算与现场实测研究了大管棚在黄土地层的作用机制。

三门峡市国道310南移新建工程周家窰黄土隧道, 左线隧道于双向贯通仅余30 m、隧道埋深70 m处的紧急停车带加宽段施工时, 进口一侧掌子面发生冒顶塌方。该文对项目塌方案例开展原因分析及现场处治方案的探讨, 提出塌方处掌子面封闭、出口端大管棚及径向注浆加固并单向掘进等综合处治措施。现场实施后效果良好, 隧道安全顺利贯通, 研究成果可为类似大断面黄土深埋隧道冒顶塌方处治提供借鉴。

1 工程概况

周家窰隧道位于河南省三门峡市陕州区, 是国道

310洛三界至豫陕界段南移新建项目的控制性工程之一。隧道按分离式双洞四车道设计, 左洞起讫里程为ZK86+502~ZK87+642, 全长1 140 m, 右洞起讫里程为YK86+585~YK87+618, 全长1 033 m。

周家窰隧道穿越区域为均质黄土梁区, 隧址区上覆20~25 m黄土状粉土, 为上更新统新黄土, 具Ⅵ级湿陷性, 承载力基本容许值为100~120 kPa; 局部夹有黄土状粉质黏土, 承载力基本容许值为120~150 kPa; 下部为中更新统粉土, 中密~密实状, 承载力基本容许值为140~200 kPa。洞身土层竖向节理发育, 层理不明显。

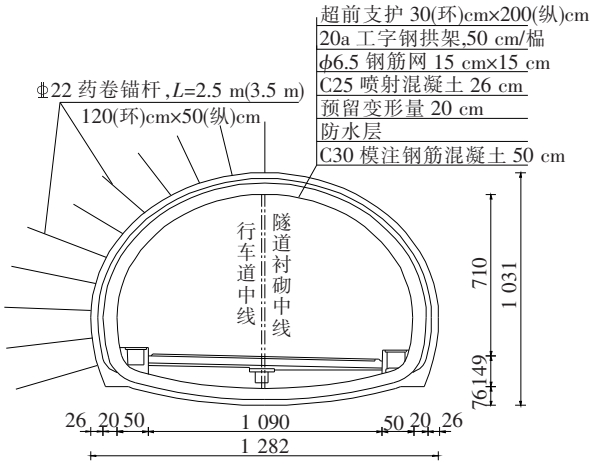
隧道全长均为Ⅴ级围岩, 采用3种复合式衬砌结构形式, 如图1所示。即: Ⅴ级洞口段, Ⅴ级深埋段和Ⅴ级紧急停车带衬砌。分为标准断面[图1(a)与图1(b)]和紧急停车带加宽断面[图1(c)]。

3种复合式衬砌均设单层小导管注浆超前支护, 小导管选用长4.5 m的 $\phi 42$ mm \times 4 mm钢管; 此外, 拱脚与边墙底部沿斜向下45°每处各打设2根长4 m、 $\phi 42$ mm \times 4 mm锁脚锚管。

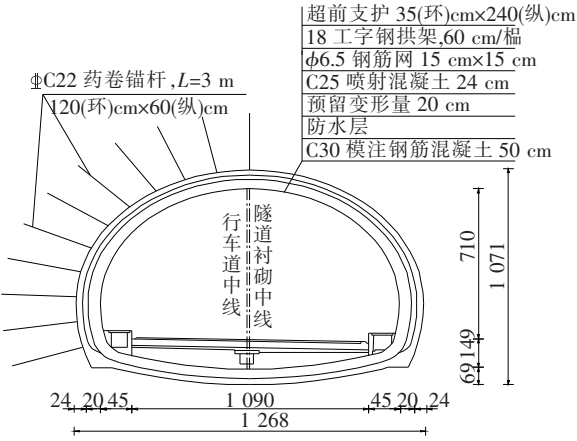
2 周家窰隧道塌方概述及原因分析

2.1 塌方概述

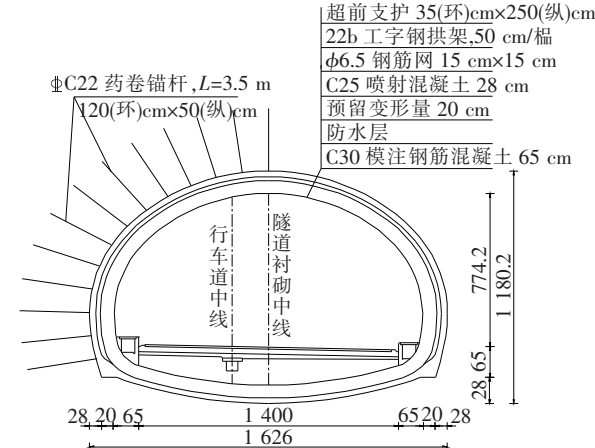
自2017年10月开工以来, 周家窰隧道左洞采用短台阶法施工, 其中上台阶单循环进尺0.5 m(一榀拱架), 中下台阶单循环进尺1 m(两榀拱架)。仰拱单循



(a) V级洞口段



(b) V级深埋段



(c) V级紧急停车带

图 1 周家窰隧道复合式衬砌结构类型(单位:cm)

环进尺 2 m(4 榀拱架);为防止上部初期支护两侧拱脚同时悬空,下半断面的开挖采用左右交错开挖;采用 42 mm 的小导管注浆进行超前加固,小导管外插角的 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,按拱部 120° 范围布置,超前加固 2 m(4 榀拱架)一循环。进出口两端同时掘进,原计划左洞于 ZK87+128 里程处贯通。2019 年 1 月 15 日,隧道左

洞洛三界端(进口)上台阶掌子面施工至紧急停车带加宽段(ZK87+063~ZK87+132)内里程 ZK87+102 处,当晚 23:30 之后,进口端上台阶开挖完毕准备架立钢拱架时,掌子面附近土体出现持续掉块,初期支护发生开裂变形;凌晨 24:00 左右,现场随即组织施工人员撤离,用时约 10 min。人员安全撤离后不久,洞外听见持续 6~8 s 巨响,事后发现掌子面滑塌并沿小里程方向连续塌方至 ZK87+080,洞内涌进土方量约 $1\ 600\text{ m}^3$ 。塌方时进口段仰拱里程为 ZK87+63,上中下台阶分别开挖至 ZK87+102、ZK87+86、ZK87+72。

塌方段地质纵剖面示意图如图 2 所示。隧道上方地表地形平坦,埋深约 70 m。涌进隧道内的土体主要以松散黄土为主,夹杂有约 1.5 m 尺度土块。塌方地段处于果园灌溉区,土质疏松,可能存在水囊空腔,加之降雨影响,塌方后下台阶仰拱处出现持续渗水现象,短时间内渗水量可达 $2\sim 3\text{ m}^3/\text{h}$,并且土体含水率较高,约为 20.3%,隧道的上覆荷载增大,是导致塌方的重要原因。洞内塌方现场见图 3。

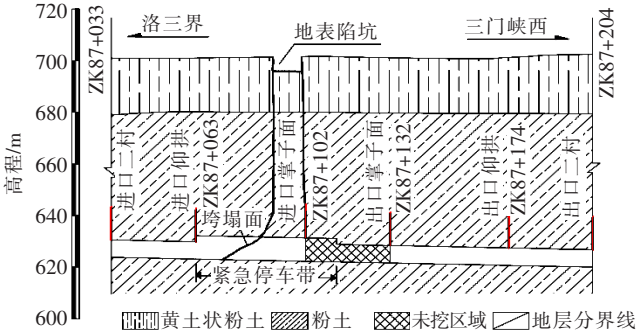


图 2 左线塌方段地质纵剖面图



图 3 ZK87+080 塌方情况

尽管隧道埋深约 70 m,该塌方仍冒顶至地表,现场陷坑照片如图 4 所示。位于左洞 ZK87+088~ZK87+100 正上方地表,呈直径约 12 m、深度 8.5 m 的近圆形,坑周四壁陡立,可观察到垂直裂隙发育。地表排查发现 ZK87+885、ZK87+090 及 ZK87+012 几处上方地表位置各有 1 处直径 8 m、深 6 m、内有 50 cm 水深的圆形水窖,3 处水窖至左线线路中线的距离

分别为 21、5.3 和 12 m。此外,坑洞正西方向约 10 m 位置为一条灌溉水渠。



图 4 ZK87+088~ZK87+100 上方地表陷坑

2.2 塌方原因分析

- (1) 周家窰隧道洞身穿越黄土地层,黄土竖向节理发育,围岩压力以竖向压力为主,侧向压力小,隧道承载拱效应弱。
- (2) 隧道采用短台阶法施工,塌方段上台阶单循环进尺 0.5 m(一榀钢拱架),恰好处于紧急停车带加宽段,开挖跨度增大,黄土地层松弛压力随之增加。

- (3) 塌方发生时,左洞进出口两端掌子面纵向相距约 30 m,对向施工可能存在相互影响;开挖卸载进一步引起水平向应力降低,黄土地层稳定性变差。
 - (4) 塌方后沿地表巡查发现,上方地表存在果园灌溉渠道及长期通水储水的水窖,下方地层含水量增加,土体强度降低。
- 综上,在多种因素交织影响下,即便隧道埋深较大,开挖后支护结构将承受较大竖向荷载作用,施工稍有不慎易引发小范围垮塌,直至连锁反应快速恶化,最终形成埋深 70 m 条件下直通地表的连续冒顶塌方。

3 塌方处治方案

隧道冒顶塌方后,经各方商议,决定遵循“稳定塌体、超前加固、单向掘进、地表回填”的总体处治原则,依据图 5 流程对塌方进行洞内外综合处治,具体处治方案如图 6 所示。

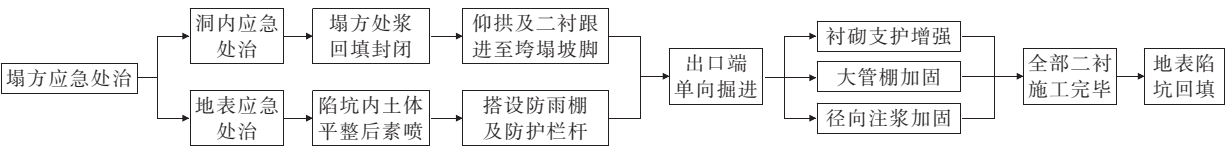


图 5 塌方处治方案流程图

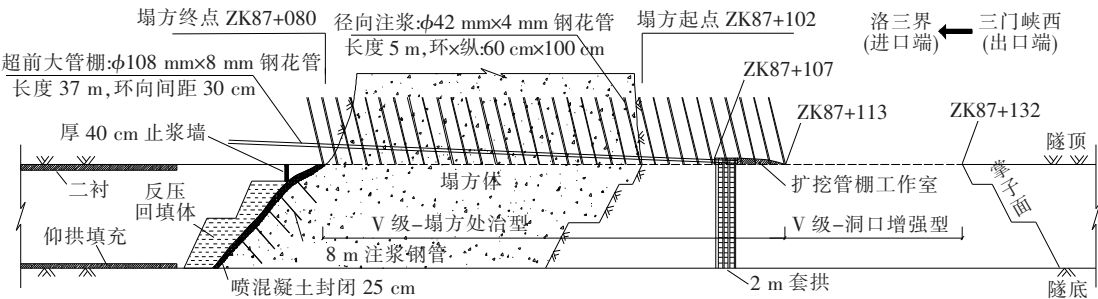


图 6 塌方处治方案示意图

3.1 应急处治

- 为防止塌方进一步发展,对洞内塌方体及地表陷坑进行紧急处理,主要措施如下:
- (1) 塌方临时稳定后,对垮塌土体喷射 25 cm 厚 C25 早强混凝土封闭,打设 8 m 长注浆钢管以稳固垮塌面坡脚,随后外运土体反压成两台阶状,并在上台阶前端施作 40 cm 厚混凝土挡墙以支撑垮塌土体坡顶后方拱架。
 - (2) 尽快施作进口端仰拱及二衬,紧跟至垮塌土

- 体坡脚 ZK87+070;抓紧施作出口端仰拱及二衬,跟进至下台阶后方。
 - (3) 地表应急处治与洞内应急处治同时进行。首先对地表陷坑底部土体进行人工整平,并回填 20 cm 厚素混凝土垫层,随后在陷坑周围搭设防雨棚和安全防护栏杆,以阻止地表水坑内汇聚渗入。
- 3.2 洞内处治
- 鉴于塌方段 ZK87+080~ZK87+102 初期支护已严重变形,从进口端处理需进行换拱施工,风险较

高,加之塌方后进出口两端掌子面仅相距 52 m,继续采用两端掘进的方式可能导致二次塌方,故决定塌方处保持封闭,由出口端单向掘进 ZK87+132~ZK87+080 段。

如图 6 所示,出口端按短台阶法施工,掘进过程中采用“衬砌支护加强+超前大管棚+径向注浆”联合加固,严格遵循“短进尺、强支护、早闭合”原则,每开挖一钢支撑间距,立即架设一榀钢支撑并喷射混凝土至设计厚度,使之形成强度后及时承载。此外,及时施作仰拱和二次衬砌,控制掌子面至仰拱距离在 25 m 内,掌子面至二衬距离在 70 m 内。

待出口端单向掘进至 ZK87+080 隧道贯通后,对 ZK87+070~ZK87+080 段初支进行排查,若侵限不超过 5 cm 则立即施作二次衬砌,否则采取换拱处理。换拱位置需保持每天监测,待稳定后施作二次衬砌。

3.2.1 衬砌支护加强

ZK87+132~ZK87+113 段衬砌支护由原 V 级—深埋型[图 1(b)]更改为 V 级—洞口型[图 1(a)]。ZK87+113~ZK87+080 段衬砌支护由原 V 级—紧急停车带型[图 1(c)]更改为 V 级—塌方加强型,其支护参数具体变更如下:

- (1) 维持原设计内轮廓尺寸,中线及防排水设施不变。
- (2) 初支混凝土厚度由 28 cm 增至 30 cm;钢筋网由 $\phi 6.5$ mm(单层)增至 $\phi 8$ mm(双层),环 \times 纵间距由原 15 mm \times 15 mm 调整为 20 mm \times 20 mm;型钢支护采用 H200 mm \times 200 mm(原设计为 I20b 工字钢),间距仍保持 50 cm,预留变形量增大至 60 cm。
- (3) 锁脚锚杆规格及打设方式均不变,钢管直径由 $\phi 42$ mm 增至 $\phi 76$ mm。
- (4) 二次衬砌环向主筋直径由 22 mm 增至 25 mm,模筑混凝土等级 C30,厚度 65 cm。

3.2.2 大管棚超前支护

如图 7 所示,出口端按短台阶法单榀循环进尺施工至 ZK87+113 后,洞内扩挖 0.5~1 m 形成管棚工作室(ZK87+113~ZK87+107,长 6 m),进一步施作套拱(ZK87+109~ZK87+107,长 2 m)。套拱采用 C25 混凝土,厚度 60 cm,拱内设置 4 榀 20a 工字钢(纵向间距 50 cm),底部设置 C15 混凝土垫块基础,套拱浇筑前在拱部 120°范围布置环距为 40 cm 的 $\phi 133$ mm \times 4 mm 孔口管。

套拱施工完成后开始施作大管棚,管棚支护参数如表 1 所示。管棚采用 $\phi 108$ mm \times 8 mm 热轧无缝钢

管,管中增设 3 根加强筋,并采用等边三角形布置,管棚沿孔口管以 1°~2°的倾角打入土体,随后注入水灰比为 1:1 的水泥浆液,注浆压力控制在 0.5~1.0 MPa,注浆结束后管体内填满水泥砂浆以增加管体强度与刚度。



图 7 洞内管棚施工

表 1 管棚支护参数

项目		参数
大管棚	材料	$\phi 108$ mm 热轧无缝钢管
	总长度	37 m
	环向间距	40 cm
	范围	120°
加强筋	材料	$\phi 24$ mm 螺纹钢
	布置形式	等边三角形

3.2.3 径向注浆加固

在 ZK87+113~ZK87+080 段增设径向小导管注浆,加固范围为临塌方侧 150°内,小导管及注浆参数见表 2。径向注浆在初期支护完成后紧跟施作,以 3 m 为一个段落循环,小导管管壁钻注浆孔,孔径 8 mm,孔距 10 cm,呈梅花形布置,尾部 30 cm 不钻注浆孔作为止浆段。注浆材料采用水灰比为 1:1 的纯水泥浆,在地下水较大时采用水泥—水玻璃双液浆(水泥浆/水玻璃体积比 1:0.8),注浆后采用注水泥砂浆充填导管孔,以增加导管刚度。

表 2 径向注浆小导管参数

项目	参数	项目	参数
材料	$\phi 42$ mm \times 4 mm 钢管	环 \times 纵间距	60 cm \times 100 cm
长度	6 m	外插角度	88°

3.3 地表陷坑处治

地表陷坑处治待二衬全部施工完成后实施。首先拆除应急处理时搭设的雨棚及防护栏杆,对陷坑底面进行清渣并浇筑 20 cm 厚钢筋混凝土作为隔水层;考虑取材方便及恢复果园种植功能,分层回填的材料采

用三七灰土,其中每层回填土中均设钢筋网以增加回填土的整体性;此外,为防止陷坑回填处地表积水下渗,在回填处地表周围设置截水沟,回填土顶部设置1 m厚的黏土隔水层和0.5 m的种植土层,并保证该处地表回填后高出周围地表不小于50 cm。

4 处治效果

周家窰隧道采用塌方处注浆回填封闭,另一端在“衬砌支护加强+大管棚+径向注浆”联合加固下单向掘进、地表陷坑分层回填的总体方案,共52 m的单向掘进段总耗时7个月顺利贯通,全段初支变形较小无需换拱施工,图8为紧急停车带加宽段正常施工照片。处治完成后,根据衬砌60 d、地表20 d的监测及后续观察量测,施作贯通后隧道的二次衬砌应力应变值及地表沉降值趋于稳定,说明整体处治效果良好。



图8 ZK87+080~ZK87+102紧急停车带处治施工照片

5 结论

通过洞内外综合治理,周家窰隧道塌方段安全顺利贯通,贯通完成2个月后现场巡查未见不良病害,处治效果良好。得到以下结论:

(1)“衬砌增强+大管棚+径向注浆”的联合加固方案在周家窰黄土隧道塌方处治中应用效果良好,可为类似工程提供参考。

(2)竖向节理发育的黄土地层,节理切割形成竖向软弱面,在对向开挖的黄土隧道贯通前,因两端开挖面相互影响大更易导致塌方发生,此时若一端掌子面

塌方严重,宜优先考虑采用塌方处掌子面封闭后由对向端单向掘进的处治方案。

(3)大断面黄土隧道即便埋深大仍存在塌方隐患,施工期间应严格遵循“短进尺、快封闭、预加固、强支护、严治水、勤量测”的原则,依据洞内受力变形、渗水情况及地表位移等多方面信息反馈,及时调整支护参数和施工方案。

参考文献:

- [1] 李骏,邵生俊,李国良,等.黄土隧道的湿陷变形规律及其对衬砌结构的作用[J].岩石力学与工程学报,2018(1).
- [2] 赖金星,樊浩博,来弘鹏,等.软弱黄土隧道变形规律现场测试与分析[J].岩土力学,2015(7).
- [3] 李宁,朱才辉.黄土隧道设计与施工中的几个问题[J].地下空间与工程学报,2016(6).
- [4] 马时强.软弱围岩大变形演化特征探讨与支护理念的辩证思考[J].中外公路,2018(4).
- [5] 扈世民,张顶立.大断面黄土隧道破坏模式离散元分析[J].北京交通大学学报,2013(4).
- [6] 梁小勇,扈世民,张春会.深埋大断面黄土隧道围岩失稳试验研究[J].岩土工程学报,2013(S2).
- [7] 马士伟,韩学谄,廖凯,等.大断面软弱围岩隧道防塌方实时监测预警标准研究[J].铁道工程学报,2014(9).
- [8] 顾伟红,王胜国.基于ISM和模糊故障树的铁路黄土隧道塌方风险分析[J].安全与环境学报,2016(5).
- [9] 张巨功,宿钟鸣.大断面黄土隧道初期支护合理设置形式研究[J].中外公路,2016(2).
- [10] 赖金星,邱军领,牛方园,等.浅埋偏压黄土隧道塌方处治及效果分析[J].现代隧道技术,2017(2).
- [11] 赵虎生.梨树塔隧道病害成因分析及综合治理[J].公路,2014(5).
- [12] 徐新芳,金成.大管棚在黄土隧道塌方处理中的应用及效果分析[J].公路,2016(12).
- [13] 孙雁军,阳军生,杨峰,等.对向施工隧道贯通前开挖面稳定性上限有限元分析[J].哈尔滨工程大学学报,2019(7).
- [14] 王鹏,杜文涛,汤明,等.复杂岩溶区特大断面小净距隧道洞口塌方处治技术[J].中外公路,2019(2).