

高陡边坡环境下隧道斜交洞口工程关键技术

谢 枫¹, 章华金², 董福明³

[1. 绍兴市柯桥区轨道交通集团有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司
上海市 200092; 3. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 510000]

摘 要: 以绍兴市群贤路西延萧山南秀路二期工程礼陀山隧道出口为例, 针对高陡边仰坡隧道洞口的设计和施工难题, 对落石风险较大的斜交洞口进行主动及被动复合防护、加长部分明洞段等措施, 有效地保障了隧道洞口的边坡稳定性。同时, 超前管棚、超前小导管等进洞加强措施确保了洞口段的施工安全, 也进一步起到了加固洞口边坡、稳定坡面和进洞施工安全的作用。实践证明, 所采取的一系列措施有效保障了群贤路隧道斜交进洞施工的顺利进行。群贤路隧道高陡边坡斜交进洞的顺利实施, 是类似工程设计和施工的成功范例。

关键词: 隧道洞口; 复合防护; 边坡及仰坡稳定性

中图分类号: U459

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0380-07

Key Technology of Tunnel Oblique Portal Engineering under High and Steep Slope Environment

XIE Feng¹, ZHANG Huajin², DONG Fuming³

[1. Shaoxing Keqiao District Rail Transit Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China]

Abstract: Taking the Liduo Mountain Tunnel Exit of the Shaoxing Qunxian Road West Expansion Xiaoshan Nanxiu Road Phase II Project as an example, aiming at the difficulties in the design and construction of tunnel portal on the high and steep side face upward slope, the measures of active and passive composite protection for the oblique portals with a relatively high risk of rockfall, and extending the partial open tunnel section are taken to effectively ensure the stability of the side slopes at the tunnel portal. At the same time, the advanced pipe sheds, advanced small conduits and other strengthening measures for entering the tunnel are taken to ensure the construction safety of tunnel portal section, and also further play a role in reinforcing the slope of the tunnel portal, stabilizing the slope surface and ensuring the safety of construction entering the tunnel. The practice has proven that a series of taken measures have successfully guaranteed the smooth construction of the oblique portal of Xianxiu Road Tunnel. The successful implementation of the high and steep side slope oblique tunnel portal of Qunxian Road Tunnel is a successful example for the design and construction of similar projects.

Keywords: tunnel portal; composite protection; slope and face upward slope stability

0 引 言

我国隧道及地下工程事业已逐渐由平原地区向地形复杂的高陡边坡山区发展。高陡边坡隧道洞口通常处于地形起伏大、岩体风化程度较高、围岩节理发育地段, 容易形成洞口边坡开裂、落石、危岩崩塌等危害^[1]。

国内外对于隧道洞口稳定性问题已有大量研

究^[2-15]。庞甲辉等^[16]以老鹰岩隧道为背景, 通过数值模拟对高速公路隧道进洞口边坡稳定性展开分析。结果表明, 随着埋深的增加, 坡面各点位的水平位移逐渐减小, 竖向位移则逐渐增大, 且边坡的安全系数也逐渐增加, 与开挖后未进行支护的边坡相比, 开挖后采取支护措施的边坡安全系数增加更明显。冯中亮等^[17]采用有限元软件对偏压隧道进行数值模拟, 分析施工过程中围岩和边坡稳定性, 揭示了不同应力释放率下隧道拱顶沉降规律和应力分布状态。张军良等^[18]采用数值模拟方法, 分析了高陡边坡开挖对既有铁路隧道的影响并对高陡边坡施工方案进

收稿日期: 2024-12-04

作者简介: 谢枫(1992—), 男, 本科, 工程师, 从事工程建设管理工作。

行了优化研究。

本文以绍兴市群贤路西延萧山南秀路二期工程礼陀山隧道北线出洞口为例^[19],采取复合防护措施进行洞口高陡边仰坡防护,确保边仰坡的稳定性和施工安全。

1 工程概况

该工程实施范围东起绍兴市柯桥区 104 国道南复线,路线以隧道形式向西连续穿越礼陀山、美女山,出隧道后向北下穿杭深铁路桥,继续途经杨汛桥镇后至中兴路北侧止,路线全长约 5.34 km。礼陀山洞口位置北线分别为 NK0+427、NK3+435,北线隧道段长约 3 008 m;礼陀山洞口位置南线分别为 SK0+424、SK3+481,南线隧道段长约 3 057 m。

穿越礼陀山的隧道为双洞矿山法断面。群贤路采用城市主干路标准,设计速度 60 km/h,车道规模为双向 6 车道。该工程设置 9 处人行横通道+3 处车行横通道+2 处设备用房。

该工程重难点在于:

(1)礼陀山隧道洞口天然仰坡较陡峭,存在危岩落石风险。

(2)加长明洞段隧底主要为填土层,地基承载力不足。

(3)隧道斜交进洞,洞口偏压严重,地面线北高南低。

2 礼陀山隧道出口工程地质评价

2.1 工程地质条件

根据现场调查,礼陀山隧道北线出洞口开挖面基岩大面积裸露,岩性为白垩系黄尖组(K1h)青灰色凝灰岩,坡顶覆盖层厚度小于 1 m,1 级坡以中风化凝灰岩为主,节理裂隙发育,岩体较破碎,岩体结构以块状为主;2 级坡以中风化凝灰岩为主,但表部风化较 1 级坡强烈,局部残留风化土,褐黄色,节理裂隙发育-很发育,岩体结构以碎块石镶嵌结构为主。隧道从 1 级坡面中风化基岩中出洞,岩质较硬,中风化岩饱和抗压强度为 44.1~60.2 MPa。

隧道出洞口 10~20 m 范围为现状农地,表部填土厚度 4~7 m,填土成分以黏性土夹碎石为主,黏性土可塑-软塑状,填土下部局部夹原堆填碎块石,揭露厚度约 1.6 m,底部为中风化凝灰岩。另外,根据现场调查,隧道出口的南侧开挖面未见明显构造痕迹,但受人工开挖影响,局部节理裂隙面表部呈张开状

态,部分开挖形成的块体前缘呈临空状态,岩体松动,存在一定掉块风险;碎落台和排水沟局部可见坡面塌落的碎块石,块径 20~50 cm,个别大于 1 m,呈棱角状。因出洞口开挖边坡长期暴露,发育有受开挖影响的二次裂隙面,产状复杂,岩体相互切割,在强降雨、强震动影响下易产生边坡失稳及滑塌现象。

2.2 边坡稳定性分析

目前出洞口边坡整体基岩出露条件较好,现状边坡稳定,水文地质条件较简单。本次采用理正边坡稳定性分析软件中的三维楔形体稳定分析模块,对可能产生楔形滑动的岩体进行稳定性计算。岩体容重取 26 kN/m³,凝灰岩结构面强度按照表 1 饱和工况取值,模拟考虑裂隙水情况,因裂隙主要为表部张开,本次模拟未考虑张裂隙影响。通过模拟各节理面组合和仰坡坡面的关系,得出节理①、③与仰坡坡面滑动分离岩体的可能性较大的结论。边坡岩体主要计算参数列于表 1。

表 1 边坡岩体主要计算参数表

平面	倾向/(°)	倾角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
节理①	63	88	40	23
节理③	39	30	40	23
仰坡顶面	315	5		
仰坡坡面	315	53		

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013),计算得到边坡稳定性安全系数为 2.51>1.35,说明隧道出口边仰坡产生整体滑移的可能性较小;但在恶劣天气影响及施工开挖对节理裂隙结构面的破坏影响下,局部可能产生崩塌、掉块现象。

2.3 崩塌落石分析

边坡天然状态下,根据概化模型分析结果,松动岩体最远可弹跳至距坡脚约 30 m 以外,坡脚弹跳最大高度可达 5 m 左右;隧道建成后,明洞上覆黏性土,崩塌落石弹跳至道路上的概率大大降低,弹跳距离基本在洞口 15 m 范围以内,洞顶及路面最大弹跳高度基本在 5 m 以下。实际情况中现状碎落台表部覆有黏性土,并植有树木,也会在一定程度上削减和阻挡落石对下方结构物的影响。为进一步分析东侧开挖面落石风险,本次在隧道出口附近选取东侧典型断面进行分析,其落石大小和计算原理与隧道出口断面落石分析一致,坡面参数按照基岩裸露考虑,碎落台及坡脚按照土类考虑。

根据概化模型分析结果,东侧开挖面选取的典型断面落石可弹跳至坡脚 40 m 以外,弹跳高度一般

在5 m以下。因东侧开挖面高度较大,弹跳距离较远,可能会对隧道洞口有一定影响。

2.4 工程地质条件评价

出洞口段以中风化凝灰岩为主,围岩等级为Ⅳ级围岩。根据进出洞口地质条件及模拟计算结果分析,出洞口边坡现状处于基本稳定状态,主要存在的风险为崩塌、掉块及落石。建议对边坡表面松动块石进行清理,并对边坡进行适当修整,洞口上方的现状2级坡放坡坡率建议自下而上按照1:0.75和1:1.00放坡,第1级坡高10 m,第2级放至坡顶,级间设置碎落台。碎落平台采用植树、覆土、被动网等措施,并根据边坡开挖情况进行动态设计施工,注意加强坡面排水设计。

此外,因采坑边坡长期暴露,表部节理裂隙局部张开,风化相对强烈,存在一定的崩塌、落石风险,建议对坡面设置主动防护网,避免二次爆破振动影响其崩塌掉块;对岩体破碎、呈块石碎石以及裂隙张开段应进行锚杆加固;施工时应选择合适的施工方式,遵循自上而下分级开挖的原则,减少施工扰动,并加强监测和巡查工作。洞口有条件时可适当延长明洞,建议上覆厚层松软土,洞口两侧设置拦碎石挡墙或被动防护网,以减小崩塌落石对结构物的影响;同时结合专题研究成果优化设计方案。另外,应注意隧道出口附近现状为农地,表部填土厚度为3~7 m,明洞基础应进行地基处理或采取桩基础。

3 隧道设计

礼陀山隧道起终点设计里程桩号为北线NK0+427~NK3+435、南线SK0+424~SK3+481,双洞双向6车道设计。隧道北线、南线封闭段长度分别为3 008、3 057 m,通行重型货车及仅限通行非危险化学品等机动车。根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018年版)及《公路隧道设计细则》(D70—2010)规定,本隧道按一类特长城市隧道标准设计。

隧道的轮廓断面设计不仅需要符合隧道建筑限界的相关规定,确保隧道在运营过程中具备足够的空间和结构稳定性,还需综合考虑多种因素。例如,照明系统、排水设施、防灾措施以及运营管理等设备的安装空间和装修要求,这些都需要在设计阶段充分考虑。为了确保隧道的功能性和使用安全,设计过程中会细致分析各类设施的布局,合理安排空间,避免设备安装与隧道本体结构之间的冲突或不合理布局。

隧道内轮廓图见图1。

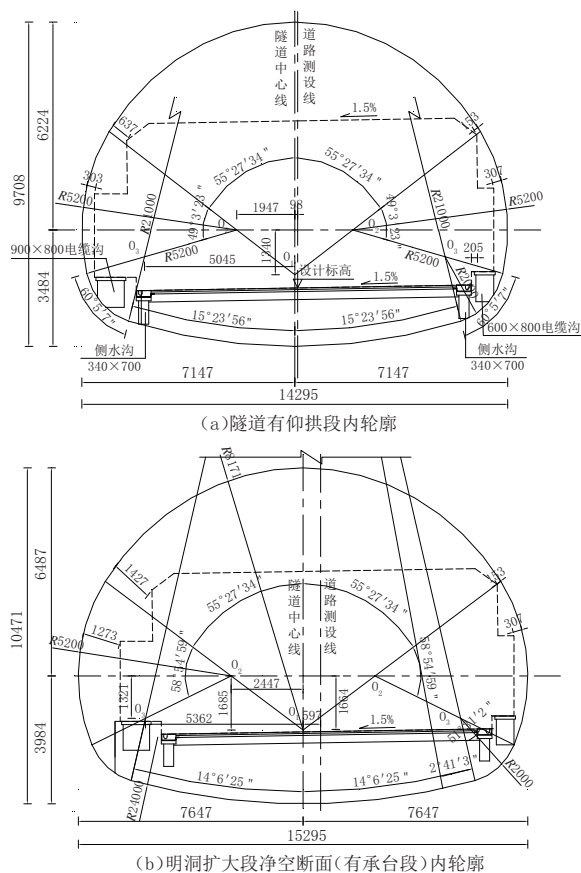


图1 隧道内轮廓图(单位:mm)

4 洞口位置及隧道洞门设计

洞门位置的确定遵循“早进洞、晚出洞”的原则,以确保边坡和仰坡的稳定性。洞门的形式应考虑“与周围自然环境相适应、结构安全可靠、经济且美观,同时有利于引导行车视线”等多方面因素。最终设计时,需要根据洞口的地形、地质状况以及自然环境等具体情况进行综合分析和合理决策。

为保证洞口的安全并减少对自然环境的干扰,隧道洞口周围的边坡不宜进行大规模的开挖。因此,选择了开挖高度较小的端墙式洞门形式,并通过延长明洞和回填绿化,使隧道与自然环境更加和谐融合。洞口临时边坡的开挖采用自上而下、分段进行的方法,并在开挖过程中同步施加网、锚和喷射混凝土等临时支护措施。隧道的进出口均采用端墙式洞门,明洞部分则使用钢筋混凝土进行衬砌。

根据洞口段的地质条件,选择了加强型衬砌,并采用喷射、锚固、网格以及工字钢架等临时支护措施。该段洞口围岩的等级主要为Ⅴ级或Ⅳ级,因此在施工过程中,采用了大管棚超前预支护技术,以进一步保障洞口段的稳定性和安全性。洞口加强段的

长度可以根据开挖过程中暴露的地质条件适时进行调整。二次衬砌的拱墙和仰拱混凝土浇筑将紧随开挖进度进行施工。

4.1 进洞加强措施

该项目采用的进洞加强设计措施有超前长管棚、超前小导管和围岩注浆加固。

4.1.1 超前长管棚

超前长管棚的设置通常位于隧道洞口部位,其环向间距设定为 35 cm,以确保足够的支撑力。管棚选用的是 B127×6 mm 规格的热轧无缝钢管,每节长度为 6 m,采用长 15 cm 的丝扣进行连接。管棚的长度需根据隧道入口的地形特点和当地的地质条件进行综合分析和灵活调整,不同的地质环境和洞口形态可能需要不同长度的管棚来提供适当的支护效果。

超前长管棚断面图见图 2。

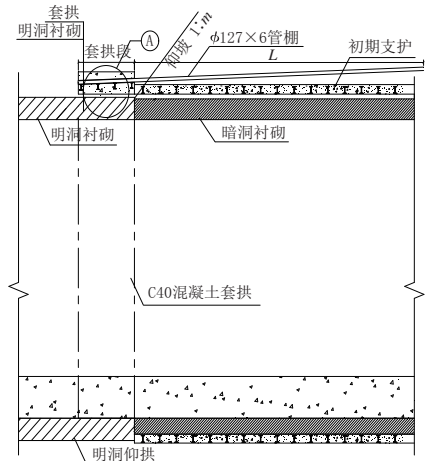


图2 超前长管棚断面图

钢管应设置在隧道衬砌拱部,且其中心与衬砌设计外轮廓线的距离应保持在 35 cm,同时钢管布置应平行于路面中线。在实际施工过程中,钢管的位置偏差不得超过 20 cm,以确保施工精度和结构的稳定性。为了确保管棚的均匀性和强度,在隧道纵向的同一横断面内,钢管接头的数量不能超过 50%,且相邻接头之间的距离需至少保持 1 m,避免因集中应力而导致的结构不均匀。

在管棚注浆施工完成后,应使用 M30 水泥砂浆对管内进行填充。填充砂浆不仅能够有效增加管棚的密实性,还能进一步增强管棚的支护效果,提高其在隧道施工过程中对围岩的支撑能力,确保隧道洞口段的稳定性。

考虑到钻进过程中可能出现的下垂现象,钻孔方向应相对于钢管设计方向向上偏移 1°。为了确保

钻孔方向准确,在明暗分界处设置了厚度为 700 cm 的 C40 钢架混凝土套拱。长管棚施工完成后,方可开始洞内开挖作业。

4.1.2 超前小导管

超前小导管采用 $\phi 50$ 热轧无缝钢管,管壁厚度为 5 mm,每节管长为 4.5 m。管口段前 0.5 m 范围内不设孔洞,其他部分则按照 15 cm 的间距交错设置注浆孔,孔径为 8 mm。在注浆过程中,注浆压力应保持在 0.5~1.0 MPa,并且逐步增加,以确保注浆的均匀性和有效性。钢管的环向间距通常设定为 35 cm,外插角度为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,以确保管棚的支撑力和稳定性。在尾端 1 m 范围内,管壁上将钻设 $\phi 6$ mm 的压浆孔,以便更好地完成注浆工作。同时,为了增强管棚的稳定性,钢管尾端应支撑在钢架上,避免因外力或地质变化而导致管棚位移或变形。

超前小导管支护设计图见图 3,剖面图见图 4。

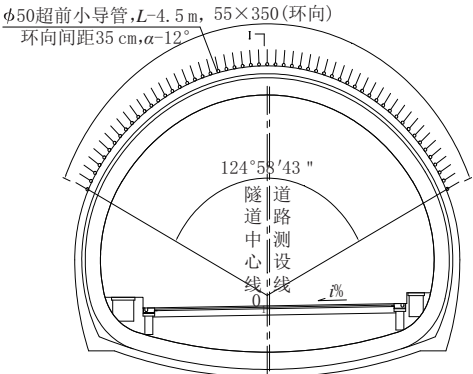


图3 超前小导管支护设计图

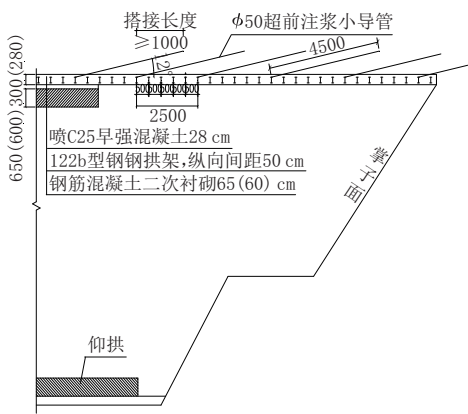


图4 超前小导管剖面图(单位:mm)

4.1.3 注浆加固

在隧道构造破碎带等不良地质下,根据监控量测结果,为了加固围岩、减少渗水量,可对隧道掌子面前方或隧道开挖轮廓线外一定范围内的岩体进行劈裂注浆加固。根据需要,可采用超前全断面注浆,超前周边注浆、局部注浆和径向注浆。

岩石地层的注浆设计压力应根据围岩的水文地质条件进行科学合理的确定。通常情况下,设计压力应比静水压力高出0.5~1.5 MPa,以确保注浆效果。当围岩的静水压力较高时,注浆设计压力应提高至静水压力的2~3倍,以应对较大水压对岩层稳定性的影响。为确保注浆过程中能够有效推进,注浆泵的工作压力通常要达到设计压力的1.3~1.5倍,这样可以确保注浆过程的顺利进行,且能够有效地充填岩石裂隙,提升围岩的稳定性。

对于常见的破碎地段,通常使用普通水泥单液浆进行注浆;当破碎带的水压力较大且单液浆的堵水效果不理想时,可改用普通水泥与水玻璃混合的双液浆,主要用于掌子面的封闭处理。

超前帷幕注浆加固体的28 d无侧限抗压强度不小于1.6 MPa,超前水平钻孔取芯率不小于70%,要求透水率不大于2 Lu。

周边径向注浆图见图5。

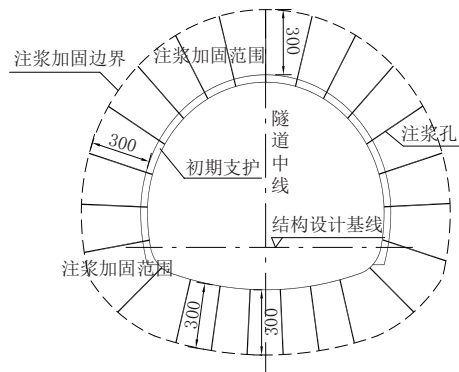


图5 周边径向注浆图(单位:mm)

4.2 明洞设计

礼陀山隧道出口加长明洞段隧底主要为填土层,地基承载力不足。考虑隧道使用年限长且后期维修较困难、成本高,相比于地基换填处理,设计采用桩基础+承台+耳墙的承载结构,以保证隧道长期正常运营,避免换填开挖及临时基坑围护。

桩基础采用圆形端承桩,桩直径1.5 m,混凝土强度等级为C40,桩身纵筋级别为HRB400;礼陀山隧道出口桩长分别为9、12 m,横向间距为3.5 m。端承桩示意图见图6。

4.3 坡面防护

礼陀山隧道北线出洞口里程桩号为NK3+435,南线出洞桩号为SK3+481,2洞中心间距约23 m,设计底板高程16.07~16.35 m,地面高程8.99~68.48 m。洞口附近边坡人工开挖分为2级,开挖面坡度可达45°以上,部分开挖面近似陡立,中间设有宽约3~

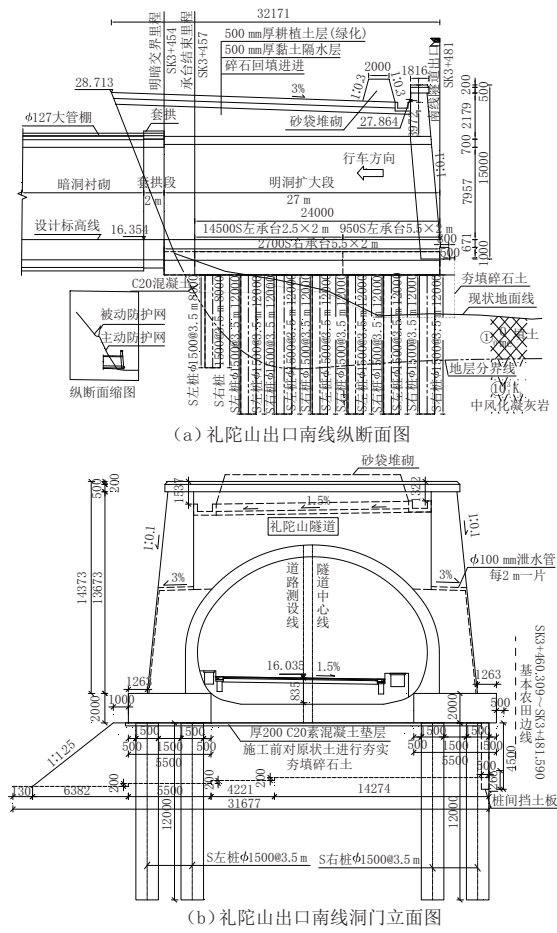


图6 端承桩示意图(单位:mm)

5 m的碎落台。现状坡体开挖后坡高约10~50 m,出洞口围岩类别为V~IV级围岩;边坡开挖坡率建议覆盖层为1:1.25,强风化层1:0.75~1:1.00,中风化层1:0.50~1:0.75。洞口天然仰坡较陡峭,采用加长明洞+主动防护网+被动防护网+洞顶回填缓冲池+防落石挡墙多种防护方式来避免高仰坡危岩落石风险。主动防护网设置在1级边坡上,宽度为隧道结构边线外扩20 m;被动防护网设置在1、2级边坡中间马道上,宽度为结构边线外扩30 m。

4.3.1 主动防护网

主动防护网采用GPS2型SNS柔性防护系统,这种系统特别适用于挖方边坡表层风化或破碎较为严重的岩质路段,尤其是那些容易发生崩塌或落石的地段。该系统设计的目标是通过灵活性强、抗冲击能力高的材料,为边坡提供有效的支撑和保护,防止岩石或土体的不稳定性引发崩塌和石块滑落,从而减少安全隐患。

纵横交错的C6横向支撑绳和C12纵向支撑绳与布置为4.5 m×4.5 m的正方形网格锚杆连接,并进行预张拉。对于边缘部分,根据实际需要,可将网格调整为4.5 m×2.5 m的矩形结构。在每个4.5 m×4.5 m

(或调整后的 4.5 m×2.5 m) 网格内, 铺设 1 张型号为 DO/08/300/4×4 m (或 4×2 m) 的钢丝绳网, 这些网格通过缝合绳与周围的支撑绳连接, 拉紧后即可确保网格的稳定性和牢固性。该预张拉工艺通过在坡面上施加一定的法向预紧力, 有效增强了表层岩土体的稳定性, 显著降低了崩塌或落石的风险。同时, 预张拉还可将小型落石的运动范围限制在一定的空间内, 防止其滑落至较远区域, 减少对周围环境的破坏。在钢丝绳网的下方, 还铺设了 SO/2.2/50 型小网孔格栅网, 目的是防止小尺寸岩块的坠落, 进一步提升坡面的安全性, 确保施工区域内的岩土体更加牢固可靠。

主动防护网示意图见图 7。

4.3.2 被动防护网

被动防护网采用菱形钢丝绳网, 上下两端设置 B18 支撑绳 (双绳), 左右两端设置 B18 侧拉锚绳 (单绳), 中间每隔 50 m 设置 B18 加固拉锚绳 (单绳), 同

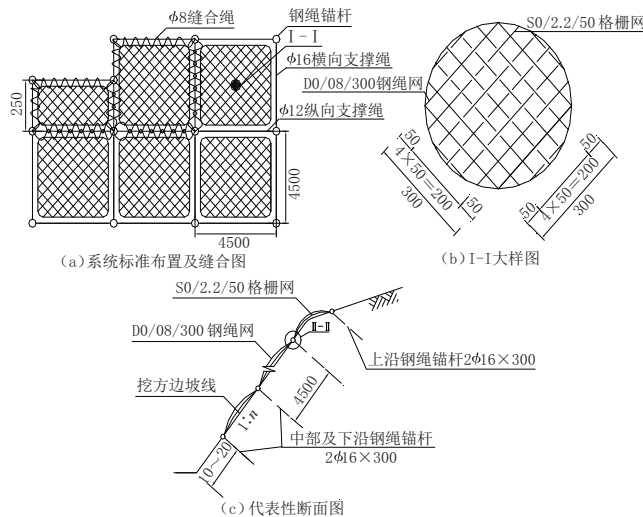


图 7 主动防护网示意图 (单位: mm)

时布置 GS-8001 减压环, 通过锚绳与坡面采用 2B16 钢绳锚杆进行锚固。柱子是热轧普通工字钢, 柱间距为 1 m。

被动防护网示意图见图 8。

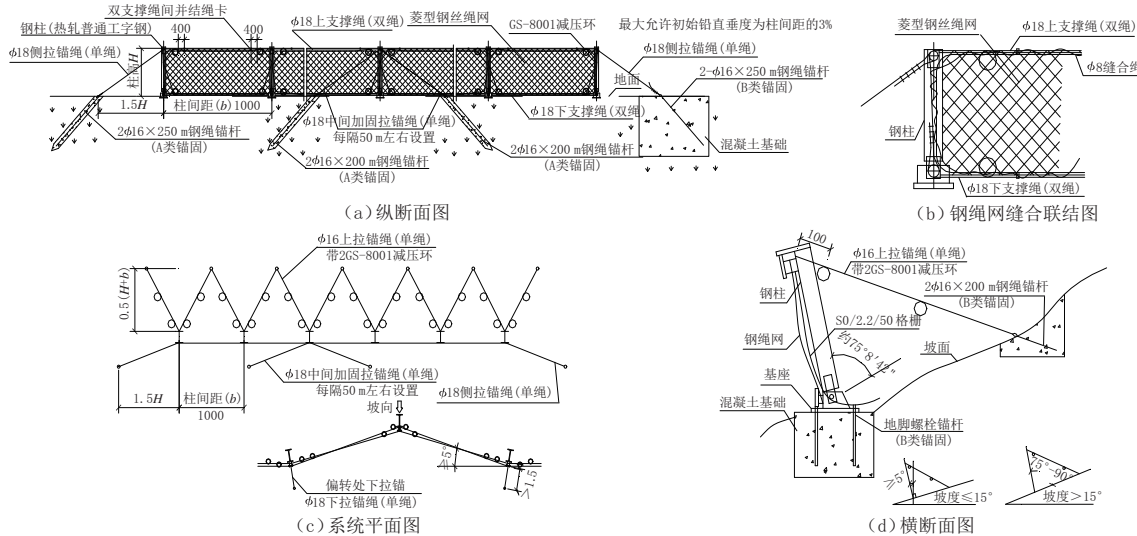


图 8 被动防护网示意图 (单位: mm)

4.4 截水及排水措施

隧道洞口区应避免水流的汇集, 防止水流冲蚀洞口结构。该项目参照《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008), 并结合各个洞口的地形地貌情况, 洞口坡顶均设截水天沟 (见图 9(a))。天沟位于边仰坡开挖线 5~10 m 外, 接市政道路排水管线, 其长度根据地形、流量等确定。端墙式洞门采用墙顶排水沟排水 (见图 9(b)), 排水沟接入路基边沟, 进口端墙后设竖向和水平向盲管, 地下水通过纵向导水管引入路基边沟。

5 结 语

(1) 洞口段围岩等级主要为 V 级或 IV 级, 采用大

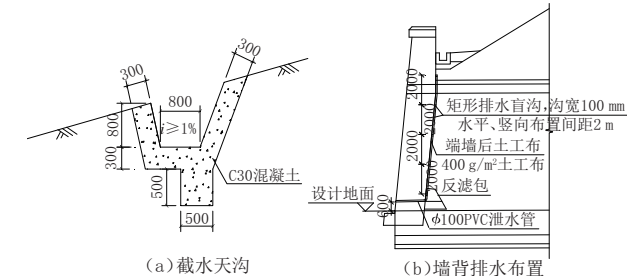


图 9 排水设计断面图 (单位: mm)

管棚超前预支护、超前小导管等进洞加强措施, 以确保洞口段稳固安全。

(2) 加长明洞段附近为现状农地, 表部主要为填土, 地基承载力不足。设计采用桩基础+承台+耳墙的承载结构, 保证隧道及挡墙整体稳定性。

(3)洞口天然仰坡较陡峭,采用加长明洞+主动防护网+被动防护网+洞顶回填缓冲池+防落石挡墙多种防护方式,避免了高仰坡危岩落石风险。

(4)洞口均设截水天沟,端墙式门洞采用墙顶排水沟排水。

参考文献:

- [1] 贾跃军,沈鹏,王东妍.铁路隧道洞口高陡边坡危岩落石危害分析及整治措施[J].中国铁路,2023(9):9-17.
- [2] 邱智钊.高速公路隧道口滑坡体治理技术分析[J].交通世界,2024(31):117-119.
- [3] 范永慧.浅埋偏压隧道洞口段盖挖施工稳定性分析[J].现代交通技术,2024,21(5):45-49.
- [4] 祝鑫,梁淦波.超大跨公路隧道洞口浅埋偏压处治方案研究[J].交通科技,2024(5):127-133;144.
- [5] 丁洪玉.公路隧道洞口开挖稳定性及落石危害分析[J].北方交通,2024(9):88-91.
- [6] 何雄飞,刘志强,孙永康.受冻融循环影响的寒区隧道洞口段地震响应研究[J].河南科技,2024,51(18):55-63.
- [7] 徐平,晏鹏博,董自超.锚索SNS主动防护网在公路隧道边坡中的应用[J].公路,2023,68(7):259-263.
- [8] 李洋溢,何克扬.大跨度隧道洞口滑坡形成机制及处治方案研究[J].公路,2022,67(9):464-469.
- [9] 李玉章,廖巧玲,黄伟伦.顺层地质隧道斜交进洞施工技术[J].西部交通科技,2022(3):62-65.
- [10] 姜波,卿韦宸,朱勇,等.西部艰险山区隧道进洞技术[J].四川建筑,2021,41(3):222-225.
- [11] 韦浩亮.公路隧道洞口工程施工技术探究[J].绿色环保建材,2020(6):170-171.
- [12] 孙亚君,蔡杨,肖海生,等.浅埋偏压隧道洞口零开挖进洞技术研究[J].建筑技术开发,2020,47(6):31-32.
- [13] 赵春滔.斜交正作浅埋偏压隧道进洞施工技术[J].智能城市,2019,5(8):178-179.
- [14] 卢宏宇.云南某隧道洞口堆积体高边坡支护设计与数值模拟研究[J].山东交通科技,2024(4):130-134.
- [15] KHELALFA H, SAKALLI U, AYGAR E B, *et al.* Slope stabilization of twin-tubes tunnel portal by anchor bolts support system[J]. Romanian Journal of Transport Infrastructure, 2022, 11(2): 1-37.
- [16] 庞甲辉.高速公路隧道进洞口边坡稳定性分析[J].工程技术研究,2023,8(23):24-26.
- [17] 冯中亮.高边坡超浅埋偏压隧道开挖稳定性控制技术研究[J].铁道建筑技术,2024(4):187-190;206.
- [18] 张军良.高陡边坡开挖对既有隧道影响及施工方案优化研究[J].铁道建筑技术,2024(10):1-5.
- [19] 徐永祥.城市主干路隧道段智慧化系统研究应用[J].城市道桥与防洪,2023(8):284-288.

(上接第374页)

- [3] 史本宁,焦学尧.基于高压旋喷桩试桩的滨海滩涂淤泥层软基处理[J].水运工程,2020(增刊1):35-39.
- [4] 范国堂.高压旋喷桩在湿陷性黄土隧道地基加固中的应用[J].中国高新科技,2023(6):51-53.
- [5] 吴松华,刘宇飞.真空预压联合不同工艺加固吹填土现场试验研究[J].城市道桥与防洪,2023(4):220-222.
- [6] 匡一成,杨铠波,尹平保,等.吹填人工岛软基处理及围堰变形监测分析[J].中外公路,2023,43(6):21-26.