

超前支护技术在公路隧道施工中的应用

苏世鹏

(四川公路桥梁建设集团有限公司机械化施工分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 为应对公路隧道施工常伴随围岩破碎、坍塌问题, 本文依托文献分析等研究方法, 分析了常规施工条件下小导管注浆、管棚支护、超前锚杆等超前支护技术的应用。继而结合突水涌泥段、塌方破碎带段、滑腔软弱区段等特殊地质, 分析了全断面帷幕注浆、双层长管棚等技术的应用。由此, 揭示了超前支护在稳定掌子面、控制围岩变形方面的作用。结论表明, 超前支护技术能降低施工风险, 优化隧道开挖过程, 为公路隧道工程提供技术保障。

关键词 公路隧道施工; 超前支护技术; 超前小导管注浆支护技术; 管棚支护技术; 超前锚杆支护技术

中图分类号: U459.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.017

0 引言

随着我国交通基础设施建设的不断发展, 隧道工程面临的地质环境日益复杂。软弱围岩失稳、断层破碎带坍塌以及高地下水压引发突涌等地质灾害频发, 对施工安全构成了极大威胁。依据相关工程实践经验, 在软弱破碎地层、砂卵石层开展隧道施工活动时, 应借助辅助施工方法预先加固围岩并完成超前支护, 以保障施工的安全性, 同时遵循“先支护、后开挖、短进尺、弱爆破、快封闭、勤量测”的施工原则, 从源头控制失稳风险。

1 公路隧道施工预加固需求分析

公路隧道施工周围的岩石条件变化较为频繁, 施工团队难以完全借助前期的勘察全面掌握岩体结构的稳定性情况。因此, 在实际开挖中, 一旦触及围岩强度较低或存在破碎带、断层带的不良地质结构, 掌子面前方岩体就容易松动或失稳, 造成塌方、掉块的风险。因此, 需要在隧道开挖前加固围岩, 减少开挖过程中围岩应力释放造成的不利影响, 维持掌子面稳定。在软弱围岩、浅埋地段和富水地层之中, 围岩的自稳能力普遍较弱, 开挖扰动通常会造成较为明显的变形, 甚至诱发地表沉降等问题^[1]。为此, 需要利用管棚、小导管注浆或超前锚杆等预加固技术, 在掌子面前方形成加固区, 提高岩体的整体强度, 同时也降低地下水对围岩结构的影响, 为后续的开挖施工提供稳定的环境。

2 常规公路隧道施工中超前支护技术的应用方法

2.1 超前小导管注浆支护技术

超前小导管注浆支护技术是在隧道掌子面前方的一定范围内沿着拱部布设小直径钢管, 利用压力注浆把浆液注入围岩裂隙与孔隙中, 加固松散岩体。该技术常用于IV级、V级围岩和断层破碎带、砂层等稳定性较差的地质条件^[2]。在具体施工过程中, 超前小导管一般使用外径42 mm~50 mm、长度3 m~5 m的钢管, 钢管前端为尖头结构, 管壁按一定间距开设注浆孔, 孔径为6 mm~10 mm。施工时, 沿隧道拱部120°~180°范围布设导管, 将环向间距控制在30 cm~50 cm, 外插角为5°~10°。钻孔直径要比导管直径大10 mm左右, 从而能顺利安装导管。导管插入后要使用水泥砂浆封口, 避免浆液回流。在隧道施工过程中, 施工人员按照设计要求控制好导管的布置角度和长度, 避免局部加固不足的问题。钻孔偏差要控制在3°以内, 使导管形成连续加固区。在富水地层, 需要依据地下水流动情况调整浆液配比, 提高浆液凝结速度。同时, 结合监控量测结果, 持续监测围岩变形、拱顶沉降的情况, 按照监测数据调整导管布置密度和注浆参数。

2.2 管棚支护技术

管棚支护技术是指在隧道掌子面前方沿拱部布设一定数量的大直径钢管, 形成连续的钢管拱架结构, 支撑上覆围岩, 形成具有承载能力的保护结构。管棚支护包含测量放样、钻孔施工、钢管安装、孔口封堵

作者简介: 苏世鹏(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

以及压力注浆多个步骤^[3]。施工前需依据隧道断面尺寸和地质条件确定管棚布置的具体形式,即扇形布置、半圆形布置、门形布置、全周布置和局部偏侧布置等。例如:拱部围岩稳定性较差时,采用扇形布置;起拱线以上围岩不稳定时,采用半圆形布置;膨胀性围岩地层要使用全周布置方式。钻孔施工还要严格控制钻孔的角度,外插角要控制在 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 内,为管棚提供稳定的支撑拱。钢管安装时要按照编号顺序分节接入,前期人工送管,后期使用钻机顶进直至预定的设计长度。相邻的钢管接头要错开布置,保证同一断面接头数量不超过一半的钢管总数,相邻接头之间的错开距离要 ≥ 1 m,提高结构的稳定性。

2.3 超前锚杆支护技术

超前锚杆支护技术也称为斜锚杆,是在掌子面周边沿开挖方向布设斜向锚杆,把锚杆一端锚固到前方稳定围岩中,另一端与钢拱架、钢筋网连接起来,在开挖前形成临时的支撑结构,承托掌子面上方围岩。该技术主要应用于IV~V级围岩的岩质地段,适用于围岩节理裂隙发育、结构面较多的隧道工程环境,从而在爆破前支撑围岩,提高围岩的整体稳定性,减少坍塌风险^[4]。该原理类似于两端支撑的梁结构,当围岩发生位移时,锚杆能够利用自身的抗弯刚度支撑围岩,以限制围岩变形。超前锚杆设计主要分为普通超前锚杆和超前自进式锚杆。普通超前锚杆常采用螺纹钢制作的全长黏结型锚杆,杆体直径一般为22 mm。岩体较完整时,也可选择18 mm~20 mm锚杆,而软弱破碎岩体施工就需要使用25 mm的锚杆来提高承载能力。锚杆的长度一般为3 m~5 m,具体使用时需要结合掌子面开挖高度、围岩的自稳能力综合确定其具体长度,同时,还要保证纵向搭接长度 ≥ 1 m。锚杆布设范围位于衬砌中线两侧 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内,若地质条件明显不对称,可采取不对称的布置方式。环向间距通常为40 cm~50 cm,围岩稳定性较差时可缩小至30 cm~40 cm,而围岩条件较好时可扩大至50 cm~60 cm。钻孔直径比杆体直径大10 mm~15 mm,并用强度等级大于M30的水泥砂浆锚固。

3 特殊地质条件下超前支护技术的应用方法

3.1 突水涌泥段的超前支护技术

突水涌泥是公路隧道施工中一种风险极高的地质灾害,主要发生在断层破碎带、岩溶发育区等区域。该地质条件下,受到地下水与松散破碎体的共同作用,稍有不慎便会引发突泥涌水,造成人员伤亡^[5]。因此,突水涌泥段实施超前支护技术的核心就是“堵排结合、

以堵为主”,利用有效的止水加固圈,把水体封堵于开挖轮廓线之外,保证掌子面的稳定。

3.1.1 超前地质预报先行

正式实施超前支护前,施工人员需要利用“长短结合”的探查方式,精准查明水文地质条件。长距离探测是指采用TSP(隧道地震波探测)或BEAM(激发极化法)探测前方100 m~150 m范围内的断层、富水带位置;短距离探测要求工作人员利用地质雷达扫描前方30 m内范围,使用超前水平钻探获取岩芯,测定水压、涌水量。

3.1.2 全断面帷幕注浆技术

全断面帷幕注浆是应对富水断层、岩溶管道最有效的一种封堵手段。施工时,要在距断层或富水段5 m~8 m处建造厚度2 m~3 m的C20喷射混凝土止浆墙,必要时还可嵌入工字钢骨架,保证其能承受3 MPa~8 MPa的注浆压力。浆液最好选用水泥—水玻璃双液浆,这种浆液具有较为稳定的凝胶时间,同时其抗动水稀释能力强,适合富水条件;微裂隙发育段可添加超细水泥或化学浆液提高渗透性。注浆过程可采用前进式分段注浆的工艺,每段5 m~8 m,逐段钻进、逐段注浆,直达到设计终压和注浆量标准,形成连续的堵水帷幕。

3.1.3 联合应用超前大管棚与止浆系统

在突水风险极高的浅埋段,单一注浆一般难以满足施工要求,此时就需要联合使用大管棚形成刚性止水结构。例如:采用 $\phi 108$ mm~ $\phi 159$ mm的热轧无缝钢管为管棚,把环向间距加密到20 cm~30 cm,再根据富水段宽度确定管棚长度,一般为15 m~40 m。管棚之间还要嵌入钢板,焊接到钢拱架上,继而形成整体的钢质止浆系统,避免高压注浆时浆液从管棚间隙流失。安装好管棚后,利用管体向围岩二次压力注浆,浆液会从管壁预留孔中溢出,在管棚周边形成一圈胶结圈,使管棚与注浆体构成一个“钢拱+混凝土”的复合承载壳。针对已经发生的局部涌水点,需采取径向注浆与局部挤压注浆补强。

3.2 塌方破碎带段的超前支护技术

破碎带属于隧道施工过程中极具危险的地质环境,此区域岩石呈现高度破碎状态且节理和裂缝广泛分布,岩体自身具备的承载力处于较低的水平,容易引发掉块、局部塌方的问题。基于此,在此类地段开展公路隧道施工时,有必要依靠“超前加固+结构承载+动态控制”的综合支护思路,创造稳定的施工环境。

首先采用管棚支护技术形成预支护承载体系。在掌子面前方布设大直径钢管,形成连续的“棚状拱架”,从而把上覆松散围岩的荷载传递至已支护区域,以此

来减弱开挖面直接承受的应力集中问题。针对破碎程度较高的地段,可采用大范围扇形布置的方式,提高支护覆盖率,同时控制外插角与钢管间距,形成连续的受力结构,避免局部失稳问题。在此基础上,同步实施小导管注浆技术,加固破碎围岩。还可以在管棚间隙布设小导管,把浆液压入围岩裂隙中,胶结松散颗粒,提升围岩的稳定性。在塌方高风险区域,要提前加密布设并完成分段注浆,必要时可采用双液浆或早强浆液,提高凝结速度,从而在掌子面前方形成稳定的加固圈。针对裂隙发育明显的区域,还需要提前布设超前锚杆,将锚杆一端锚固定于相对稳定的围岩中,另一端链接钢拱架,使破碎围岩变成相对受控的整体,从而限制围岩位移与塌落趋势。

在施工过程中,要遵循“短进尺、弱爆破、强支护、早封闭”的原则。每循环开挖都要控制在 0.5 m~1.0 m 之间,匹配钢拱架间距,严禁超挖。爆破作业要利用微震控制爆破技术,控制单段起爆药量,避免扰动破碎围岩。开挖后立即封闭掌子面及拱部,架设钢拱架,复喷混凝土到设计厚度。在此基础上,需要形成高密度的监控量测体系,在塌方段加密布设监测断面。监测频率要控制在每 2 小时~4 小时一次,24 小时持续跟踪围岩变形动态。当拱顶沉降速率连续三日超过 5 mm/d 时,要立即实施加密小导管、补做径向注浆等措施,优化支护参数,保证施工安全。

3.3 滑腔软弱区段的超前支护技术

在公路隧道施工中,滑腔软弱区段是一种极为棘手的不良地质类型,该地质条件下的围岩通常强度低、自稳能力极差。高地应力会诱发塑性流变,造成围岩持续向洞内挤入、支护结构变形过大的问题,同时滑腔往往不规则分布,局部可能存在较大的空腔。在“滑移”与“流变”的双重作用下,一旦支护不当,极易诱发初支开裂、钢架扭曲问题。因此,滑腔软弱区段的超前支护技术运用必须遵循“强韧让压、柔性支护”的原则,提供足够的强度抵抗围岩压力,也保证围岩能在可控范围内释放应力,避免压垮刚性支护。

双层管棚技术是滑腔软弱区段超前支护的最常见手段。外层管棚要沿拱部轮廓线,以较大外插角布设,深入稳定围岩形成外部承载拱。内层管棚要在外层管棚的掩护下,沿开挖轮廓线以较小外插角布设,形成防护屏障。两层管棚之间需要注浆,以此形成复合加固圈,有效抵御围岩的不均匀滑移。管棚一般采用 $\phi 108$ mm 或 $\phi 127$ mm 的热轧无缝钢管,根据滑腔宽度确定具体长度,一般情况下是 15 m~30 m,双层管棚要交错布置,形成立体的防护体系。

为应对滑腔中常见的软弱破碎带,可以使用超前小导管注浆加固技术。在管棚施做完成后,于拱部 120° 内施做超前小导管。注浆材料的选择根据滑腔充填物性质决定,泥质充填的滑腔宜采用聚氨酯类化学浆液,这一类浆液具有渗透性好、凝胶时间可控的优势,能把泥化破碎体“焊接”成一个整体;砂质或碎屑充填的滑腔最好使用水泥—水玻璃双液浆。注浆压力需要控制在 0.5 MPa~1.5 MPa 之间,注浆后形成厚度约 2 m~3 m 的加固壳,避免掌子面上方的滑移。

在软岩大变形段,需采用“预留变形量+可缩性钢架”的让压支护策略。根据围岩变形监测数据,在初期支护与二次衬砌之间预留 15 cm~30 cm 的变形空间,保证围岩在可控范围内充分释放应力。另外,初期支护钢架连接处还需设置可缩性接头,采用 U 型钢配合滑动套管结构,让钢架能够在承受一定压力后继续沿接头方向滑动收缩,待围岩应力释放到一定程度后再锁固接头,实现支护体系的受力转换。由此,这一“先让后抗”的方法能有效释放高地应力,预防刚性支护被压溃的风险,适用于软岩大变形段的超前支护体系设计。

4 结束语

超前支护技术在公路隧道施工领域中具有广泛的实用性,其核心目标就是提升工程技术精细化管控水平,保障施工品质,提高公路隧道的整体稳固性。在公路隧道施工过程中,超前支护技术支持下的围岩可以与支护结构实现高度协同,使隧道开挖成为主动优化施工条件的过程。该技术思路融合了岩体力学原理与材料性能调控方法,能够为隧道施工中的风险管控提供坚实支撑。随着超前支护技术的深化应用,需要深入探究其在不同地质环境下的适应性,同时提高智能化施工监测水平,全面提升公路隧道施工的安全管控水平。

参考文献:

- [1] 何松建.高速公路隧道施工中的超前支护技术应用[J].汽车周刊,2025(10):115-117.
- [2] 冉座东.公路隧道施工中超前支护施工技术的特点及实践探析[J].汽车周刊,2025(10):213-215.
- [3] 睦世虎.高速公路隧道施工中超前支护施工技术的具体应用[J].汽车周刊,2025(06):99-101.
- [4] 张晨阳.公路隧道施工中超前支护施工技术措施[J].四川建材,2025,51(05):173-176.
- [5] 王让林.超前支护技术在高速公路隧道施工中的应用分析[J].城市建设,2025(04):95-97.