

隧道仰拱施工关键技术及现场工序管理优化研究

郝永威

四川公路桥梁建设集团有限公司 四川 成都 610200

摘要：隧道仰拱作为隧道闭合衬砌的核心结构，其施工技术质量与现场工序管理水平，直接影响隧道整体稳定性与运营安全。本文结合隧道施工现场工况，系统分析仰拱受力机理与不同地质施工特性，梳理仰拱开挖、钢筋施工、混凝土浇筑、养护及接缝处理五大核心关键技术。针对当前工序衔接无序、资源配置不合理、质量管控薄弱等管理问题，从流程优化、交叉作业、资源管理、动态管控及进度管控五个方面提出优化方案。研究成果可有效规范仰拱施工工序，提升现场施工质量与管理效率。

关键词：隧道仰拱；施工关键技术；工序管理；优化设计；施工质量

引言：在隧道工程施工中，目前多数隧道施工现场仍采用传统粗放式施工模式，作业标准化程度低，关键工艺落实不到位。同时现场工序穿插随意、人员设备调配混乱、质量巡检流于形式，极易引发超欠挖、结构渗水、衬砌开裂等质量病害，影响隧道施工安全和后期运营寿命。为切实解决现场实际难题，本文依托隧道仰拱施工工艺与管理现状，开展核心施工技术研究与管理优化，旨在形成贴合现场、可落地的施工及管理体系，提升隧道仰拱整体施工质量。

1 隧道仰拱施工基础理论与施工特性分析

1.1 仰拱结构受力机理与支护原理

隧道仰拱是衬砌体系的底部核心构件，与拱顶、边墙形成整体闭合支护结构，主要用于承接围岩压力、平衡隧道整体受力。隧道开挖会打破原有围岩应力平衡，使周边围岩产生收敛变形，基底岩土受挤压出现底鼓应力。仰拱凭借自身结构刚度，可有效承受基底竖向隆起压力与水平侧向挤压力，并将上部衬砌荷载均匀传递至地基围岩。其支护核心是通过闭合衬砌约束围岩变形，抑制基底沉降与鼓胀病害，抵消围岩松弛产生的形变应力，避免结构局部过载、单侧受力问题，有效提升隧道支护体系的整体性与承载稳定性。

1.2 不同地质条件下仰拱施工特性差异

围岩地质条件直接决定仰拱施工难度与管控重点，不同地层的施工特性差异显著。硬质完整围岩承载能力强、底鼓变形小，施工以常规开挖、衬砌浇筑为主，重点把控结构尺寸与节点衔接精度。软岩及风化围岩强度低、遇水易软化，围岩变形速度快，施工易出现基底超挖、沉降超标问题，需严格控制开挖进尺，及时完成封闭支护。富水、破碎及浅埋围岩稳定性极差，存在渗水、坍塌风险，施工需优先落实排水与基底加固措施，

压缩工序间隔，减少围岩裸露时间，规避各类基底结构隐患^[1]。

2 隧道仰拱核心施工关键技术

2.1 仰拱开挖精准控制施工技术

仰拱开挖精度直接影响结构尺寸及基底承载稳定性，施工以精准控形、控尺、控基底质量为核心，实施精细化开挖管控。（1）测量放线控制。施工前依托隧道中线与高程控制点，采用全站仪精准布设仰拱开挖轮廓线、基底控制线及超欠挖控制线，边墙高程标识点间距不大于2m。曲线隧道适当加密点位，放线完成后执行双人复核制度，确保放线数据精准无误。（2）分层分段开挖作业。严格遵循“短进尺、弱爆破、勤支护”原则，根据围岩等级严控开挖进尺，Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩单次进尺 $\leq 3\text{m}$ ，硬质围岩进尺控制在5m以内。采用先中部、后两侧的对称分层开挖方式，避免单侧开挖扰动围岩，防止基底整体松动变形。（3）超欠挖专项管控。采用微差弱爆破技术，优化炮孔参数与装药量，降低爆破震动对基底围岩的损伤。机械开挖预留20cm人工修整层，杜绝机械直接掏挖至设计标高。超挖部位采用同级混凝土回填找平，欠挖部位人工凿除修整，保证基底轮廓、标高完全满足设计要求。

2.2 仰拱钢筋绑扎与定位精细化施工技术

仰拱钢筋施工主要把控下料精度、保护层厚度、钢筋间距及骨架定位效果，解决钢筋偏移、绑扎松散、保护层不足等常见问题，保障钢筋骨架成型质量。（1）钢筋预处理与下料。进场钢筋统一开展调直、除锈处理，剔除开裂、严重锈蚀、弯折超标杆件。严格依据设计图纸集中统一下料，精准控制搭接、锚固长度，加工完成后分类挂牌堆放，杜绝混用错用，从源头控制加工精度。（2）钢筋绑扎施工。基底验收合格后布设高强度混

凝土垫块,保证保护层厚度均匀达标。底层钢筋严格控制纵横间距,采用梅花形满扎工艺,杜绝漏扎、虚扎。双层钢筋布设专用马凳支撑,合理控制间距,防止上层钢筋下沉、错位。(3)钢筋精准定位固定。依据隧道弧度标定骨架控制线,绑扎过程实时校正位置。边墙预留钢筋与仰拱钢筋对接时保证轴线顺直,搭接位置加密绑扎点,提升整体稳定性。

2.3 仰拱混凝土浇筑与振捣密实技术

混凝土浇筑与振捣的施工重点是管控浇筑顺序、分层厚度及振捣工艺,有效规避蜂窝、麻面、空洞、分层离析等质量缺陷。(1)浇筑前期准备。浇筑前彻底清理基底积水、浮渣与杂物,复查钢筋位置、保护层及模板密封性,封堵模板缝隙防止漏浆。提前调试输送设备,检测混凝土坍落度与和易性,不合格材料严禁入模。

(2)分层对称浇筑。采用分段分层、双向对称浇筑方式,从两端向中间推进,单层浇筑厚度控制在30cm以内。匀速连续入模,降低混凝土对钢筋、模板的冲击,减少施工冷缝产生。(3)精细化振捣作业。采用插入式振捣器施工,振捣器插入下层混凝土5~10cm,遵循快插慢拔原则,振捣点均匀布设。以表面泛浆、无气泡溢出为振捣标准,杜绝过振、漏振^[2]。

2.4 仰拱养护及防开裂控制技术

混凝土收缩、内外温差过大、养护滞后是仰拱开裂的主要原因,施工通过标准化养护与针对性防控措施,有效控制结构裂缝产生。(1)适时开展养护作业。混凝土初凝后及时采用土工布全覆盖保湿养护,常温条件下12h内启动养护,高温环境缩短至6h内,低温天气增设保温覆盖层,防止混凝土受冻、风干开裂。(2)恒温恒湿养护管控。养护期间持续洒水保持土工布湿润,普通混凝土养护周期不少于7d,掺外加剂混凝土养护不少于14d。严控结构内外温差,规避暴晒、低温等极端环境影响,降低温度收缩应力。(3)结构性防裂防控。优化混凝土配合比,严控水胶比,减小收缩变形。规范设置施工缝与变形缝并配套止水构造,规避应力集中。

2.5 仰拱与边墙衔接成型施工技术

仰拱与边墙衔接位置为衬砌结构薄弱节点,施工重点是管控基面处理、钢筋对接及节点浇筑质量,保障衬砌整体闭合效果。(1)接缝基面处理。对边墙底部接缝位置进行人工凿毛,剔除浮浆、松散混凝土,露出坚实骨料。施工前采用高压水枪冲洗基面,清理粉尘与杂物,保证接缝洁净、湿润、无积水。(2)钢筋精准衔接。校正边墙预留钢筋的位置与角度,保证与仰拱钢筋对接顺直、搭接长度达标,衔接节点加密绑扎加固,保

证钢筋骨架整体性,避免出现受力薄弱断面。(3)衔接段浇筑成型。优先浇筑接缝部位,重点加强振捣作业,消除接缝空洞与缝隙。浇筑完成后及时收面压实,控制平整度,杜绝结构错台^[3]。

3 隧道仰拱施工现场工序管理现存问题

结合隧道施工现场实操情况,当前仰拱施工工序管理仍存在以下多处共性问题:(1)工序衔接无序化。现场多存在仰拱开挖、基底清理、钢筋施工、混凝土浇筑各工序穿插混乱的情况,未严格执行流水施工制度。部分班组为追赶工期,在上道工序未验收合格时提前开展下道施工,工序间隔时间不规范,易造成基底围岩长时间裸露、施工冷缝等质量隐患。(2)现场资源配置不合理。施工人员岗位职责划分模糊,技术交底流于形式,一线作业人员操作规范性参差不齐。施工机械设备调配不及时,仰拱施工专用设备闲置、混用情况频发,设备维保不到位,易出现施工中途停机,直接影响工序推进效率。(3)现场质量管控不到位。施工现场常态化巡检机制落实不足,针对超欠挖控制、钢筋定位、混凝土振捣等关键工序,缺乏全过程动态监管。(4)材料与现场管理松散。钢筋、外加剂、养护材料堆放杂乱,防潮、防尘保护措施缺失,材料质量难以保障。同时施工现场文明施工管理薄弱,杂物、积水清理不及时,干扰正常工序施工,制约整体施工质量与进度^[4]。

4 隧道仰拱施工现场工序管理优化方案设计

4.1 工序标准化流程重构与细化

结合隧道仰拱施工现场乱象问题,摒弃原有粗放式施工流程,重构标准化、模块化工序流程,明确各环节施工边界与验收标准。(1)固定标准施工流程。统一规范仰拱施工全流程,按照“测量放线→基底开挖→基底清理验收→钢筋布设→模板安装→混凝土浇筑→振捣收面→养护成型→接缝处理”固定工序施工,严禁随意颠倒工序、跳序施工,杜绝交叉作业混乱问题。(2)细化各工序管控标准。针对每道工序制定专项作业指导书,明确开挖进尺、钢筋间距、浇筑厚度、振捣频次等量化参数,统一现场施工标准。同时划定各工序施工时长,根据围岩等级、施工设备性能,合理设定单段仰拱施工周期,避免工序拖沓、工期失控。(3)落实工序报验制度。实行“上道工序不合格、下道工序不施工”原则,每道工序完成后,由班组自检、技术人员复检、监理验收三级核查,验收合格后方可进入下一工序,从流程上规避质量隐患。

4.2 多工序交叉施工衔接优化策略

针对现场工序衔接脱节、交叉干扰严重等问题,优

化流水施工模式,压缩工序间隔,提升施工连续性。

(1)划分分区流水作业。将隧道仰拱施工段落划分为独立作业区间,实行分区流水施工,开挖、钢筋、浇筑班组分区同步作业,避免多班组扎堆干扰,解决工序穿插混乱问题。(2)严控工序间隔时间。明确围岩裸露管控标准,软弱围岩地段基底清理完成后4小时内启动钢筋施工,硬质围岩不超过8小时,减少基底风化、泡水软化风险。混凝土浇筑与接缝处理无缝衔接,杜绝施工冷缝产生。(3)建立工序交接台账。安排专人负责工序交接记录,实时登记各工序开工、完工及验收时间,及时梳理衔接滞后问题,动态调整施工节奏,保障各工序有序衔接、闭环推进。

4.3 现场人员、设备与材料精细化管理优化

针对现场资源配置不合理、管理松散问题,细化人员、设备、材料管控细则,提升现场资源利用效率。

(1)人员定岗定责。明确施工班组、技术员、质检员、安全员岗位职责,划分专属施工管控区域,落实岗位追责制度。定期开展实操技能培训与现场技术交底,统一作业标准,杜绝不规范操作。(2)设备专项管控。配置专属仰拱施工设备,固定设备作业区间,避免设备频繁调动、混用。建立设备日常维保台账,每日施工前检查设备性能,及时排查故障,杜绝施工中设备停机误工。(3)材料规范化管理。施工现场划分专用材料堆放区,钢筋、水泥、外加剂分类堆放,做好防雨、防潮、防尘防护。材料进场实行抽检制度,不合格材料严禁入场,同时按需领用材料,减少现场材料堆积、浪费问题。

4.4 施工质量与安全动态管控体系优化

结合现场质量安全管控短板,构建全过程动态管控体系,实现施工全过程可监管、可追溯。(1)全过程动态巡检。组建专项巡检小组,对开挖精度、钢筋施工、混凝土浇筑等关键工序实行全程旁站监管,实时排查超欠挖、钢筋偏移、振捣不实等问题,发现隐患立即整改。(2)隐蔽工程重点管控。仰拱基底、钢筋骨架、接缝施工等隐蔽工序,施工完成后必须留存影像资料与验收记录,完善施工档案,保障隐蔽工程质量可控可查。(3)现场安全常态化管控。规范临边防护、临时用

电、机械作业安全标准,定期排查隧道基底积水、围岩松动、机械作业盲区等安全隐患,落实班前安全交底制度,规避施工安全事故^[5]。

4.5 工序施工进度管控优化措施

针对工期滞后、施工节奏混乱问题,制定精细化进度管控措施,保障仰拱施工进度稳步推进。(1)制定分段进度计划。结合隧道整体施工总进度,分解单段仰拱施工任务,制定日进度、周进度计划,明确每日施工任务与节点目标。(2)动态调整施工计划。每日核对施工进度完成情况,对滞后工序分析原因,通过增补作业人员、优化设备调配、延长有效作业时长等方式,及时追回工期偏差。(3)建立进度考核机制。将施工进度、工序质量与班组绩效挂钩,对按期、保质完成施工任务的班组予以奖励,对拖沓施工、违规作业的班组进行考核整改,调动施工积极性。

结束语:本文通过梳理隧道仰拱基础施工特性,系统总结了仰拱开挖、钢筋定位、混凝土浇筑养护及节点衔接的核心施工技术,明确了现场施工工艺管控重点。同时结合施工现场实际,归纳了工序衔接无序、资源配置不合理、质量管控缺失等管理问题,并针对性提出流程标准化、交叉作业优化、资源精细化及动态管控等优化措施。通过工艺提质与管理增效双向优化,可有效改善仰拱施工质量缺陷,规范现场施工秩序。

参考文献

- [1]刘宏.高铁长大隧道仰拱混凝土机械化施工技术[J].建筑机械化,2025,46(11):28-31.
- [2]董文颂.隧道仰拱重型拱架整体快速安装施工技术研究[J].工程机械与维修,2025(11):26-28.
- [3]阳斌,郭红斌,钟庆丰,李文华,孙武刚,陈威明.TBM法矿山隧道仰拱同步施工技术与装备研制[J].建筑机械化,2025,46(8):75-79.
- [4]白雪鹏.安全管理科技系统在高速铁路隧道施工中的应用[J].价值工程,2026,45(5):161-164.
- [5]李子豪.公路隧道工程标准化施工管理与安全风险防范措施[J].行车指南,2026(6):0178-0180.