

隧洞开挖与衬砌一体化施工组织设计优化研究

景楠

中国水利水电第十二工程局有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8933

[摘要] 隧洞工程作为交通、水利及城市地下空间开发的关键基础设施，其施工组织设计的合理性直接影响工程安全、进度与成本。传统隧洞施工中开挖与衬砌工序相互分离，导致资源利用率低、围岩暴露时间长、衬砌质量难以保障等问题。因此，本文对隧洞开挖与衬砌一体化施工组织设计优化进行了研究，旨在为复杂地质条件下隧洞工程的高效施工组织提供理论参考与方法支撑。

[关键词] 隧洞开挖；衬砌一体化；施工组织设计；优化

Research on Optimization of Integrated Construction Organization Design for Tunnel Excavation and Lining

Jing Nan

China Water Resources and Hydropower Bureau No.12 Co., Ltd.

[Abstract] As a critical infrastructure for transportation, water conservancy, and urban underground space development, the rationality of construction organization design in tunnel projects directly impacts project safety, progress, and cost. In traditional tunnel construction, the excavation and lining processes are separated, leading to issues such as low resource utilization efficiency, prolonged exposure of surrounding rock, and difficulties in ensuring lining quality. Therefore, this study investigates the optimization of integrated construction organization design for tunnel excavation and lining, aiming to provide theoretical references and methodological support for efficient construction organization under complex geological conditions.

[Key words] Tunnel excavation; Integrated lining; Construction organization design; Optimization

引言

随着隧道掘进技术的进步与施工管理理念的更新，一体化施工理念逐渐受到重视。一体化并非简单地缩短工序间隔，而是要求在组织设计层面实现开挖与衬砌在目标、节奏、资源、信息等多维度的协同。然而，当前关于一体化施工组织设计的研究多停留在经验总结层面，缺乏系统的优化路径分析。因此，本文从组织设计的基本原理出发，建立开挖与衬砌一体化的理论框架，并在此基础上提出具体的优化策略。

1 工程概况

石马潭水库工程位于东阳市北部东阳江支流白溪流域，石马潭水库西库坝址位于石马坑水库坝址上游200m、石马村上游350m处；东库坝址位于潘坑溪巍山镇山口村上游约900m处。工程任务以供水、防洪为主，兼顾改善水生态环境等综合利用。石马潭水库工程由石马潭水库西库、东库和连通工程等组成。石马潭水库西库由拦河坝、泄（放）水建筑物、进水口及输水隧洞、道路工程、下游河道整治及防护工程等组成，东库由拦河坝、泄（放）水建筑物、进水口、道路工程、下游河道整治及防护工程等组成。连通工程包括磐溪堰坝、东方红提水泵站、东潘引水隧洞、潘石连通隧洞、磐石引水隧洞、检修交通洞等，

引水隧洞线路总长22.43km。本工程东库布置1条导流洞，导流洞布置在左岸，导流洞进口位于老料场南侧山脚处，出口位于坝址左岸下游约300m处，连接下游现状河道。导流洞进口底板高程为154.00m，出口底板高程为140.26m，隧洞洞身全长338.267m，过水断面为5m×5m（B×H）的城门洞型，平均纵坡4.06%，隧洞轴线在平面上设置1个弯段，转弯角度为15°，转弯半径为50m。

2 一体化施工组织设计的要素

2.1 施工流程重构

传统流程呈现“开挖→清底→初期支护→养护→二次衬砌”的线性序列，各工序之间界限分明，存在大量等待时间。一体化流程则将开挖与衬砌重新组织为两条并行且相互关联的作业链：开挖作业链包括钻孔、爆破、出渣、初支；衬砌作业链包括防水层铺设、钢筋绑扎、模板就位、混凝土浇筑与养护。两条作业链在空间上保持固定间距，在时间上保持同步推进，形成“前挖后衬”的流水作业格局。

2.2 空间组织优化

作业面需要划分若干功能区：前端为开挖作业区，配备钻爆或掘进设备；中部为初支与防水作业区；后端为衬砌作业区，

配置模板台车及混凝土施工设备。各功能区之间应保持安全距离，避免交叉作业风险。同时需合理规划运输通道，确保出渣车辆与混凝土运输车辆有序通行，必要时设置错车洞或采用单线运输调度方案^[1]。

2.3 资源配置整合

资源配置整合体现在设备共享、材料统筹与人员协同三个层面：在设备方面，通风系统、排水系统、供电线路等临时设施统一规划；出渣运输系统兼顾衬砌材料运输需求；在材料方面，开挖所用爆破器材与衬砌所用钢筋、混凝土等材料统一采购、分区存储、按需配送；在人员方面，开挖与衬砌作业队伍可在管理层面上实现统一调度，减少协调成本。

2.4 进度计划协同

一体化施工进度计划需采用“节拍同步”原则，开挖进尺速度与衬砌浇筑速度应相互匹配，避免一方过快造成等待或一方过慢形成瓶颈。通常以衬砌作业循环时间为基准确定开挖进尺速率，因为衬砌作业受混凝土养护时间制约，调节弹性较小。通过计算确定合理的步长与步距，使两条作业线保持动态平衡。

3 一体化施工组织设计的优化路径

3.1 施工工艺优化路径

3.1.1 开挖工艺适应性调整

一体化施工对开挖工艺提出了新的要求。爆破开挖需严格控制超欠挖，确保围岩轮廓平整，为后续衬砌创造良好条件。周边孔加密布置、采用光面爆破或预裂爆破技术，减少爆破振动对围岩的扰动。出渣作业应快速高效，缩短清底时间，为衬砌台车尽快就位创造条件。对于地质条件复杂区段，可考虑采用悬臂掘进机等机械开挖方式，减少爆破对已衬砌段的震动影响。

3.1.2 衬砌工艺快速化改造

在一体化施工背景下，衬砌工艺需要实现快速化。采用全液压自动行走模板台车，缩短模板就位与脱模时间。推广使用高性能混凝土或早强混凝土，缩短养护等待时间。优化混凝土配合比设计，在保证强度与耐久性的前提下提高早期强度发展速率。采用附着式振捣与插入式振捣相结合的方式，提高混凝土密实度，减少修补作业。防水层铺设采用机械辅助方式，提高铺设速度与质量。

3.1.3 工序衔接精细化设计

在开挖完成后，初支作业应在规定时间内完成，初支喷射混凝土可采用湿喷工艺并掺加速凝剂。防水层铺设与初支作业可安排在同一工作班次内完成。钢筋绑扎可采用预制网片现场安装的方式，减少洞内作业时间。模板台车就位前应进行断面测量，确保台车轮廓与开挖轮廓匹配，减少调整时间。各工序之间建立明确的交接验收标准，避免因质量问题导致返工延误^[2]。

3.2 资源配置优化路径

3.2.1 运输系统优化

运输系统是一体化施工的“血管系统”，出渣运输与混凝土运输共用同一运输通道时，需制定严格的交通管制方案，并采用“定时分时”制度，在特定时段集中安排出渣，其他时段安排材料运输。条件允许时可设置双轨运输或环形运输线路。石马潭水库工程连通隧洞距离较长，可考虑在适当位置设置错车洞，提升运输效率。运输车辆配置方面，采用大吨位自卸车与混凝土搅拌运输车，减少单车次运输时间。

3.2.2 临时设施统筹布置

临时设施包括供风系统、供水系统、供电系统、通风系统等，一体化施工条件下，这些系统应满足开挖与衬砌两个作业区的复合需求。供风系统容量需同时满足凿岩设备与喷浆设备用风需求；供水系统需保证爆破降尘与混凝土养护用水；供电系统需具备足够容量并采用双回路供电保障；通风系统需根据作业面推进动态调整风管延伸，确保两个作业区均有良好空气质量。

3.2.3 模板台车配置优化

根据隧洞断面形状与尺寸，选择或定制适宜的模板台车型式。可采用穿行式模板台车，其衬砌作业与前方开挖作业互不干扰，是长隧洞一体化施工的首选。针梁式模板台车适用于圆形断面，但其结构复杂、行走速度较慢。对于中等长度隧洞，可考虑采用自行式液压模板台车，兼顾行走速度与衬砌精度。台车数量根据衬砌长度与进度要求确定，必要时可采用多台台车分区段平行作业。

3.3 信息化管理优化路径

3.3.1 施工监测与动态反馈

在一体化施工中，围岩变形监测与衬砌应力监测至关重要。在开挖面后方布设监测断面，实时采集围岩收敛、拱顶沉降、锚杆轴力、衬砌应力等数据。监测数据通过无线传输系统实时上传至管理平台，一旦发现异常变化立即启动预警机制。根据监测反馈动态调整开挖进尺速度、初支强度与衬砌时机，实现“监测-分析-决策-调整”的闭环控制。

3.3.2 进度智能管控系统

在BIM模型中集成施工进度信息，通过现场传感器自动采集工序完成时间，与计划进度进行实时对比。当出现进度偏差时，系统自动分析偏差原因并给出调整建议。预警机制涵盖超挖欠挖、衬砌厚度不足、养护时间不够等质量风险，以及运输车辆碰撞、交叉作业干扰等安全隐患^[3]。

3.3.3 协同管理平台构建

一体化施工涉及开挖、支护、衬砌、监测等多个专业，需要构建协同管理平台实现信息共享。平台应具备任务派发、进度跟踪、质量验收、材料管理、设备调度等功能模块。各作业班组通过移动终端接收指令、上报数据、申请验收。管理人员通过可视化界面掌握整体施工态势，及时协调解决现场问题。

3.4 地质适应性优化路径

3.4.1 不良地质段处置策略

隧洞施工不可避免地遭遇断层破碎带、软弱围岩、富水地

层等不良地质条件。在一体化施工组织设计中,需针对不同地质条件制定差异化策略。断层破碎带地段,开挖前进行超前地质预报,必要时采取超前注浆加固;开挖后立即施做超前小导管与初期支护,加密监测频率;衬砌紧跟开挖面,可考虑采用喷锚衬砌取代模筑衬砌或两者结合的方式。软弱围岩地段,控制单循环进尺长度,采用弱爆破或机械开挖;适当增加预留变形量,确保衬砌厚度满足设计要求。

3.4.2 地质预报与动态设计

在施工中,采用TSP地震波探测、地质雷达、超前钻探等多种手段相结合的综合预报方法,提前探明前方地质条件。预报结果用于指导开挖参数调整与衬砌方案优化,实现动态设计。建立地质信息数据库,积累地质条件与施工响应数据,为后续类似工程提供参考。

3.5 组织管理优化路径

3.5.1 扁平化组织架构

设立一体化施工指挥部,统一管理开挖与衬砌两个作业区。指挥部下设工程技术组、物资设备组、安全质量组、调度协调组,各组之间信息畅通、协同高效。取消传统管理中开挖队与衬砌队之间的行政壁垒,实行项目经理直接领导的作业班组管理模式。建立快速决策机制,赋予现场调度人员必要的处置权限。

3.5.2 绩效考核机制设计

建立激励相容的绩效考核机制,考核指标应涵盖进度、质量、安全、成本四个维度。进度指标采用“开挖+衬砌”联合考核,避免单一考核开挖进尺导致衬砌滞后;质量指标重点关注衬砌厚度、强度及背后密实度;安全指标包括围岩稳定状态、设备运行安全等。建立奖惩制度,对超额完成任务且质量优良的班组给予奖励,对造成窝工或质量问题的追究责任。

3.5.3 人员培训与技能提升

爆破工需掌握光面爆破技术,减少超欠挖;混凝土工需掌握泵送混凝土施工工艺,保证衬砌质量;台车操作手需熟练掌握模板台车行走与定位技术。开展岗前培训与技能竞赛,提升作业人员综合素质。培养“一专多能”型技术工人,使其能够胜任相邻工序作业,增强用工弹性^[4]。

3.6 一体化施工组织设计的风险防控

3.6.1 工序干扰风险

开挖爆破产生的振动可能对已浇筑衬砌混凝土造成损伤,特别是养护初期混凝土强度尚未完全发展时。防控措施包括:严格控制单段起爆药量,监测衬砌段振动速度;在衬砌混凝土达到规定强度前,暂停邻近区域爆破作业;设置缓冲段,在新浇筑衬砌与爆破面之间保留足够的安全距离。

3.6.2 运输冲突风险

建立运输调度中心,统一指挥车辆进出;设置信号灯与通讯系统;在长隧洞中设置会车洞或环形通道;高峰时段采用单向放行或定时分批放行制度。

3.6.3 通风排烟风险

开挖爆破产生的大量炮烟与出渣车辆尾气、衬砌施工粉尘叠加,增加了通风难度。防控措施包括:加大通风设备配置功率,采用压入式与抽出式相结合的混合通风方式;在开挖与衬砌之间设置风帘,分区控制气流;爆破后加大通风量进行强力排烟;采用低污染设备减少尾气排放。

3.6.4 地质灾害风险

早一体化施工条件下,开挖与衬砌距离较近,一旦发生塌方等地质灾害,可能同时危及两处作业人员安全。防控措施包括:严格执行地质预报制度,高风险区段加密预报频率;开挖面及时施做初支并封闭成环;衬砌紧跟但保持安全距离,为应急处预留空间;制定专项应急预案,储备应急物资,定期组织演练。

3.7 一体化施工组织设计的实施保障

传统施工管理中开挖班组与衬砌班组分属不同部门管理,一体化施工要求打破这种条块分割,建立统一的一体化作业指挥部或项目部。新的管理架构应赋予现场调度人员足够的决策权限,使其能够根据实时情况调整工序安排与资源分配。同时,建立跨班组的沟通协调机制,如每日联合班前会、工序交接确认单、异常情况直报通道等。例如,将衬砌质量指标纳入开挖班组的考核范围,促使开挖班组主动控制超欠挖;将开挖进度指标纳入衬砌班组的考核范围,激励衬砌班组努力提高作业效率以跟上掘进节奏^[5]。

结束语

总之,随着地下空间开发规模的不断扩大与施工技术水平的持续提升,隧洞开挖与衬砌一体化施工组织设计必将从理论走向更为广泛和深入的工程实践,为隧洞工程建设的高质量发展提供坚实支撑。施工组织设计也将从静态方案优化转向动态自适应优化,实现施工过程的自感知、自决策、自调整。石马潭水库工程作为区域重要的水利基础设施,其实践经验将为同类工程提供有益借鉴,推动隧洞施工组织设计理论与方法不断创新。

参考文献

- [1]麻玉山,吴欣.某灌浆平硐Ⅳ类围岩开挖与支护稳定性模拟分析[J].水利技术监督,2026,(1):322-327.
- [2]罗丹.水库除险工程强风化区隧洞开挖支护技术[J].云南水力发电,2025,41(11):111-114.
- [3]张文乐,黄瑜潇.黄土高原地区典型隧洞段围岩应力应变规律及稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2025,23(4):114-124.
- [4]杨逢杰,蒋军,杨健,等.基于水荷载增量过程的深埋高外水水工隧洞混凝土衬砌受力特性研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2025,50(5):112-121.DOI:10.16112/j.cnki.53-1223/n.2025.05.552.
- [5]张红星.水利工程施工中引水隧洞施工技术研究[J].科技与创新,2025,(13):208-211.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2025.13.057.