

浅埋段输水隧洞施工期围岩稳定设计

张 政

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 天津 300202

摘 要：浅埋段输水隧洞施工期围岩稳定是制约工程安全与进度的核心难题。浅埋条件下围岩自稳能力差且对施工扰动敏感，应力重分布特征与深埋段存在显著差异，受地表边界条件强烈影响。本文系统阐述了浅埋段围岩工程特性与失稳机理，从地质勘察、支护设计、施工优化及监测反馈四维度构建了围岩稳定设计方法体系，强调以超前地质预报为前提、以动态设计为核心、以信息化监测为保障的闭环理念。研究表明，建立“勘察—设计—施工—监测—反馈”五位一体的动态调控机制，是保障施工安全的关键路径。

关键词：浅埋隧洞；输水隧洞；施工期；围岩稳定；支护设计

引言：输水隧洞是长距离调水工程的关键线路建筑物，浅埋段因上覆岩土层厚度小、地质条件复杂、受地表活动影响显著，是全线施工难度最大、安全风险最高的区段。与深埋隧洞不同，浅埋段围岩稳定性受地表边界条件、岩体风化程度及地下水入渗等多重因素耦合控制，施工期间围岩自稳时间极短，对支护及时性要求极高。然而，当前浅埋段围岩稳定设计仍面临勘察精度有限与施工期地质信息快速反馈需求之间的矛盾，以及确定性分析方法与围岩行为随机性之间的矛盾。本文从浅埋段围岩工程特性出发，系统探讨施工期围岩稳定设计方法，以期同类工程提供参考。

1 浅埋段输水隧洞围岩工程特性

1.1 浅埋段的界定标准

浅埋隧洞是指上覆岩土层厚度较小，围岩应力场受地表地形强烈影响，开挖后扰动范围可延伸至地表的隧洞区段。根据《引调水线路工程地质勘察规范》(SL629)浅埋隧洞指埋深小于3倍洞径的隧洞(即 $H/D < 3$)。浅埋隧洞是指上覆岩土层厚度较小，围岩应力场受地表地形强烈影响，开挖后扰动范围可延伸至地表的隧洞区段。与深埋段不同，浅埋段以自重应力为主，侧压力系数受地形和结构面控制，松动圈可扩展至地表形成沉降槽，偏压地形及降雨入渗等因素亦需充分辨识。

1.2 浅埋段围岩的力学行为特征

浅埋段围岩开挖后的力学响应与深埋段存在本质差异。应力场方面，浅埋段以自重应力为主导，偏压地形下初始应力场呈非对称分布。开挖卸荷后径向应力迅速释放，切向应力在洞壁集中，但因上覆压力有限，应力集中程度一般低于深埋段，围岩破坏更多受结构面组合

控制。变形方面，拱顶沉降量通常远大于周边收敛，比值往往超过2~3倍，与深埋段以周边收敛为主的变形模式截然不同。同时，地表沉降槽宽度和深度直接影响地表建(构)筑物安全，成为制约施工进度。围岩破坏以拉伸破坏和沿结构面滑动为主，塑性区贯通地表的可能性较大，对支护及时性和整体性要求更高^[1]。

1.3 影响围岩稳定的主要因素

浅埋段围岩稳定受地质、设计、施工、环境四类因素耦合控制。地质因素是最根本的控制因素，包括岩体完整性(RQD)、结构面产状与组合(控制楔形体形成)、风化程度及地下水发育情况。设计因素中，隧洞断面形状影响显著——圆形或马蹄形受力优于直墙拱形，合理高宽比可减小应力集中；埋深与地形决定初始应力场特征，偏压地形需专项设计。施工因素包括开挖方法(钻爆法扰动大于机械开挖)、循环进尺及支护时机——滞后支护将扩大松动圈。环境因素中，降雨入渗使围岩含水率迅速升高、强度劣化，地表堆载或邻近施工亦改变应力状态，这些因素在浅埋段的影响强度和时效性远超深埋段。

2 施工期围岩失稳机理与破坏模式

2.1 围岩应力重分布与松动圈演化

浅埋隧洞开挖后围岩应力场重分布演化分为四个阶段。初始应力阶段，围岩由自重应力和构造应力维持平衡。开挖卸荷阶段，径向应力迅速降至零，切向应力集中升高，超过围岩强度时产生压缩破坏；拱顶岩体因失去支撑产生拉应力，发育张拉裂缝。应力调整阶段，围岩通过塑性变形释放能量，塑性区向深处扩展形成松动圈，圈内岩体裂隙张开、强度降低、承载能力削弱。稳

定或破坏阶段,支护及时有效则围岩—支护系统达到新平衡;支护不及时则松动圈持续扩展贯通地表,引发冒顶、塌方。松动圈范围是支护设计核心依据,确定方法包括理论估算(修正芬纳公式)、声波测试(波速降低率法)及地质雷达探测。浅埋段松动圈通常可扩展至地表,表现为地表沉降和裂缝开展。

2.2 典型破坏模式与分类

浅埋段围岩破坏模式根据机理和地质条件分为五种基本类型。整体失稳型表现为拱顶大面积塌方或冒顶,多见于岩体极破碎、结构面组合不利的 IV~V 级围岩,发生前兆不明显,最为危险。局部掉块型最为常见,由结构面控制的楔形体在重力作用下向洞内滑移造成,多发生于层状岩体和节理密集带,前兆为喷层开裂、掉块增多。塑性挤入型多见于软岩浅埋段,围岩向洞内持续大变形,钢拱架扭曲、喷层剥落,变形速率不受支护显著减缓^[2]。底鼓型由仰拱部位围岩在水平应力下隆起引起,多发于仰拱未及时封闭或强度不足区段。地表塌陷型是超浅埋段最严重的破坏形式,塌方贯通地表形成塌陷坑,直接威胁地表建筑和人员安全。准确识别破坏模式是制定针对性支护方案的前提。

2.3 地下水对围岩稳定的劣化效应

浅埋段地下水入渗路径短、降雨响应敏感,劣化效应远比深埋段显著,机制包括三方面。物理软化效应:水进入结构面降低其粗糙度和充填物黏聚力,使抗剪强度参数(c 、 φ 值)显著降低。力学效应:孔隙水压力增加降低有效应力和结构面法向应力,削弱岩块咬合摩擦;渗透压力对松动围岩产生推力,加剧松动圈扩展。化学与物理侵蚀效应:水流冲刷导致充填物流失,水位波动引起膨胀矿物胀缩,造成岩体结构劣化。浅埋段大气降水通过地表裂缝、松散层迅速渗入围岩,使掌子面附近围岩突变为饱和状态,稳定性急剧下降。穿越富水砂层或断层破碎带时,还可能引发流砂、涌泥等灾害,施工期防排水设计是围岩稳定控制的核心措施之一。

3 施工期围岩稳定设计方法

3.1 地质勘察与超前地质预报

浅埋段围岩稳定设计的地质信息获取须贯穿勘察与施工两阶段,形成递进式认知体系。勘察阶段应加密钻孔间距(一般 50~100m,复杂段 30~50m),查明覆盖层厚度及组成、基岩面起伏、风化壳分带、断层破碎带位置等。水文地质勘察应查明地下水类型与补排关系、渗透系数及地下水与地表水的水力联系。施工期超前地质预报构建三级体系:长距离预报(TSP, 100~150m)

识别大型断层和岩性界面;中距离预报(地质雷达, 30~50m)探测破碎带和含水构造;短距离预报(超前探测)验证结论并获取岩芯参数。掌子面地质素描和快速岩体分级(每循环开展)是实现动态修正的基础,开挖后应及时记录岩体完整性、结构面特征及地下水状况,修正围岩分级并反馈至支护设计。

3.2 围岩稳定分析与支护设计方法

浅埋段围岩稳定分析宜采用工程类比、理论计算与数值分析相结合的综合方法。工程类比法依据围岩分级(BQ 或 RMR)选取支护类型和参数,关键在于类似工程条件的可比性判断。理论计算法基于弹塑性理论(修正芬纳公式、卡斯特纳公式)求解塑性区和松动圈范围,确定锚杆长度和支护抗力,适用于规则断面均匀围岩,对层状非均质围岩适应性差。数值分析法中,有限元法(ABAQUS、MIDAS)适于连续介质应力变形分析,有限差分法(FLAC3D)适于大变形和塑性区模拟,离散元法(UDEC、3DEC)适于结构面控制的块体稳定分析。支护设计遵循“先让后抗、刚柔结合”原则,锚杆长度按组合拱理论取洞径 $1/4 \sim 1/3$,喷射混凝土厚度 80~150mm,钢拱架间距 0.5~1.5m,仰拱及时封闭形成受环。

3.3 施工方案优化与动态控制

施工方案优化核心是最大限度减少围岩扰动并加快支护封闭,遵循“短进尺、弱爆破、强支护、早封闭”原则。III 级及以上围岩采用全断面法,循环进尺 2.5~3.5m;IV 级采用台阶法,上台阶长 3~5m,进尺 1.0~2.0m;V 级必须采用分部开挖法(CD 或 CRD),单个导洞进尺 0.5~1.0m。控制爆破应严格控制单段药量和质点峰值振动速度(一般不超过 1.5~2.0cm/s),通过光面爆破和预裂爆破控制超欠挖。动态控制精髓在于建立围岩分级施工修正机制——支护参数根据掌子面实际揭露条件动态调整,每循环开挖后地质工程师快速评级,实际级别高于设计预期时按预案启动加强支护,调整方案经设计、施工、监理三方会商确认,形成规范变更审批流程^[3]。

4 施工监测与信息化反馈技术

4.1 监测项目与测点布置

施工监测是浅埋段围岩稳定设计闭环体系中最关键的验证与反馈环节。监测项目分为必测项和选测项两类。必测项目包括拱顶下沉(精密水准仪,精度 0.1mm)、周边收敛(收敛计)和地表沉降,三项构成判断围岩稳定性的基本数据来源,其中地表沉降测点

应延伸至洞轴线上及两侧 2~3 倍洞径范围。选测项目包括围岩内部位移（多点位移计）、锚杆轴力（钢筋计）、钢拱架应力（应变计）、喷射混凝土应力及孔隙水压力等，用于验证设计假设和深化机理认识。测点布置原则：监测断面间距按围岩级别确定——Ⅲ级每 50m、Ⅳ级每 30m、Ⅴ级每 15~20m 一个断面，特殊地质区段加密至每 5~10m。每个断面拱顶、左右拱腰、左右边墙布置不少于 5 个测点，地表沉降沿洞轴线和横断面形成网格状布置，横断面测线间距 3~5m。洞内监测须在开挖后 24 小时内完成初始值读取，地表沉降须在开挖前建立初始值。

4.2 监测数据分析与预警

监测数据的实时分析和科学解读是围岩稳定判断的核心依据。数据采集频率应根据施工进度和变形速率动态调整——正常阶段每日 1 次，变形加速阶段应加密至每 2~4 小时 1 次。监测数据应进行时效性处理，分别统计日变化量、累计变化量和变形速率等指标。围岩稳定判据通常采用三指标控制体系：日变形量控制标准一般为Ⅳ级围岩日下沉量不超过 0.2~0.3mm/d、Ⅴ级围岩不超过 0.3~0.5mm/d；累计变形控制标准为预留变形量的 70%~80%（预留变形量通常取洞径的 0.5%~2.0%）；变形-时间曲线形态是综合性判据——收敛型曲线（ $d^2u/dt^2 < 0$ ，变形速率逐渐减小至稳定）表明围岩趋于稳定，发散型曲线（ $d^2u/dt^2 > 0$ ，变形速率不收敛）为失稳前兆。预警按分级管理原则设定三级阈值：达到累计变形量 60%或日变形持续超限时启动黄色预警，要求加强观测频次；达到 75%时启动橙色预警，要求暂停施工、加强支护；达到 90%时启动红色预警，要求立即停工、人员撤离。地表沉降监测尚需与洞内变形联合分析，当地表沉降速率与拱顶下沉速率同步增大时，说明围岩扰动已贯通至地表，应采取紧急措施。

4.3 设计反馈与动态修正

监测数据只有转化为设计改进的决策依据，才能真正发挥信息化施工的核心价值。设计反馈机制包含三个递进层次。第一层次为参数校核，即将监测获得的实际位移值与设计阶段的预测值进行对比，若实际值显著小于预测值，说明设计偏于保守，可适度优化支护参数以

节约工期和成本；若实际值显著大于预测值，则说明设计强度不足，需及时加强支护^[4]。第二层次为围岩参数反演，即基于实测位移数据，利用数值模拟反算围岩的弹性模量、泊松比及强度参数，为后续区段的设计提供更准确的力学参数依据——这一方法在围岩条件复杂、初始勘察参数偏差较大的区段尤为有效。第三层次为设计方案修正，当监测数据持续异常或围岩条件发生显著变化时，应启动设计变更程序，按“监测→分析→判断→设计调整→施工验证→再监测”的闭环路径循环迭代。设计反馈的有效运转依赖于设计单位派驻现场代表的及时响应能力、施工单位如实报告监测数据的责任心以及监理单位的独立核验职能，三者协同构成信息化施工的组织保障，是浅埋段围岩稳定设计从静态方案走向动态调控的根本保证。

结束语

浅埋段输水隧洞施工期围岩稳定设计是事关工程安全的重大技术课题。本文从围岩工程特性出发，分析了失稳机理与破坏模式，系统构建了涵盖地质勘察与超前预报、稳定分析与支护设计、施工优化与动态控制、监测反馈与信息化修正的完整设计方法体系。研究表明，浅埋段围岩稳定的本质在于围岩自承能力与支护抗力之间的动态平衡，而实现这一平衡的核心路径是建立“勘察—设计—施工—监测—反馈”五位一体的闭环调控机制。在复杂地质条件和严苛安全要求双重约束下，围岩稳定设计不能止步于施工前的静态方案，必须通过施工期的持续认知深化和动态策略调整，才能有效控制施工风险，为输水隧洞工程安全建设提供坚实保障。

参考文献

- [1] 王涛. 岩溶区输水隧洞围岩稳定性分析与支护设计[J]. 科技与创新, 2026(12): 162-164.
- [2] 杜兰, 张晓飞. 软硬互层岩体对输水隧洞围岩稳定性的影响研究[J]. 东北水利水电, 2024, 42(5): 22-24.
- [3] 任志强. 输水隧洞支护施工及围岩稳定性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(7): 41-42, 58.
- [4] 周琼瑞. 输水隧洞主洞与施工支洞交汇区围岩安全稳定性分析[J]. 吉林水利, 2023(10): 57-61.