

# 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工技术探讨

周亚玉

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘要** 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工面临围岩变形快、地质扰动强、支护时效要求高的复杂问题。研究基于围岩支护协同理论, 系统分析精准测量、支护衔接、排水管理及动态监测的关键技术路径, 提出大管棚超前加固、锚喷协同支护、偏压稳定控制及信息化监测反馈的方法, 构建主动防控与动态调节并行的施工体系。研究结果表明, 该体系能有效抑制围岩塑性区扩展, 降低结构变形速率, 提高隧道整体稳定性与施工安全水平。

**关键词** 浅埋软弱围岩; 高速公路; 隧道施工技术

**中图分类号**: U455

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.013

## 0 引言

浅埋软弱围岩隧道在高速公路建设中具有高风险与高复杂度特征, 地层结构松散、地下水丰富、受力分布不均, 使围岩稳定控制成为施工核心议题。现代隧道施工技术正由静态设计转向数据驱动与主动加固并重模式, 强调力学调控与监测反馈的协同作用。针对浅埋段地质非均质性与偏压效应, 构建以预加固、实时监测和结构自适应调节为一体的多维控制体系, 形成稳定可控的隧道施工结构环境。

## 1 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工中的技巧

### 1.1 精准测量围岩状态, 奠定施工安全基线

精准测量围岩状态是浅埋软弱围岩隧道施工的起点, 也是控制风险的关键环节。测量工作不只关乎断面尺寸的准确性, 更是围岩稳定性与支护参数调整的核心依据。施工团队在测量前需建立三维地质模型, 利用全站仪、高精度激光扫描仪等设备对围岩形态、节理裂隙及地下水发育特征进行连续监测, 确保数据的动态更新。在围岩测量过程中, 常采用收敛变形监测与拱顶沉降测定的组合模式, 分析围岩变形速率和趋势, 从而判断围岩应力释放过程的合理性<sup>[1]</sup>。针对浅埋段的高应力集中区, 可布设多点位移计与锚杆应力计, 获取不同深度的变形数据, 实现空间分布的精细化掌控。为保证数据可靠性, 测量基准点应布设在扰动最小的稳定地段, 采取周期性复测校正误差, 形成连续的监测曲线。测量结果需实时反馈至施工指挥系统, 技术人员依据收敛速率曲线和沉降趋势图, 调整爆破参数与支护厚度, 防止围岩应力突变引发局部失稳。科学的测量体系使施工从经验型操作转向数据驱动决策, 为浅埋软弱围岩隧道提供精准的技术支撑。

### 1.2 优化开挖支护衔接, 提升结构稳定性能

优化开挖支护衔接是浅埋软弱围岩隧道稳定控制的核心环节, 任何支护滞后或参数偏差都会引发围岩应力失衡, 导致结构变形加剧。施工团队在开挖过程中应注重开挖方法、进尺控制与支护时机的有机衔接, 利用短进尺、弱爆破与即时支护的配合, 使围岩在最小扰动中实现力学平衡。开挖断面多采用分步台阶法或三台阶七步法, 以减少暴露面积, 控制围岩卸荷速率, 使应力释放过程更加平顺。支护设计要依据围岩级别与变形特征灵活调整, 形成拱架、锚杆等多层次复合体系, 强化围岩的自稳能力。支护参数控制应强调厚度、密贴度与锚固深度的协调性, 混凝土初喷厚度与钢拱架间距需经监测数据动态修正, 防止结构刚度不足或超支撑引起的应力集中<sup>[2]</sup>。衔接阶段还需严格把握初支与二衬的间隔时间, 确保围岩变形趋稳后再实施二次衬砌, 维持结构的整体协调。优化开挖与支护的衔接, 施工过程能在扰动控制、受力均化和结构闭合三方面形成联动效应, 使浅埋软弱围岩隧道在复杂应力场中保持稳定形态。

### 1.3 强化地表排水管理, 控制地下水渗透风险

强化地表排水管理是浅埋软弱围岩隧道保持稳定结构的重要控制手段, 排水系统的设计与施工直接影响围岩孔隙水压力、渗流路径以及衬砌受力状态。浅埋地段常伴随高含水层或富水断裂带, 地下水在围岩裂隙中形成渗透流, 当排水体系不完善时, 易引起围岩软化、承载力下降与拱脚失稳。排水设计需兼顾地表截排与洞内导排两个层面, 构建纵横结合的分流体系, 使渗流在进入隧道结构前被有效截断<sup>[3]</sup>。地表部分设置截水沟与盲沟, 控制汇水范围, 防止雨水集中

渗入围岩；洞内部分利用仰拱排水管、环向盲沟和纵向主排水管形成完整导排网络，保证地下水能迅速排出施工区。排水构筑物施工应重视坡度控制与衔接密封，防止渗漏回流造成二次浸润。为保持系统长期稳定，需结合监测数据动态评估水位变化，利用自动化监测设备实时掌握水流量与孔压分布，必要时调整排水路径或加设反滤层以降低渗透压力。科学的排水管理能在源头削减围岩含水量，缓解结构受力不均，使隧道处于干燥稳定的工作环境中，保证施工安全与衬砌耐久性。

## 2 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工技术

### 2.1 大管棚超前加固技术实施

大管棚超前加固技术在浅埋软弱围岩隧道施工中承担着支护先导的功能，在开挖前形成受力稳定的加固拱环，使围岩的自稳能力在扰动发生前得到强化。该技术基于地层结构力学与渗流固结理论，利用钢管注浆在洞口及浅埋段建立封闭支护体，实现对开挖面的有效约束，减弱应力集中效应。加固体在空间上形成环向封闭的力学体系，将松散、破碎的围岩转化为具备整体性的承载结构，使初期支护不再单独承担外压，而由钢管拱环与围岩共同分担荷载，提升隧道的稳定性。

该技术的实施应遵循分步设计、精准施工、密封注浆的系统原则。加固结构的形成依赖“拱环效应”，钢管与注浆固结体之间的界面黏结是其发挥承载性能的关键，孔隙率、注浆压力与钢管间距的合理匹配直接决定加固区的力学性能。在浅埋软弱围岩地层中，施工团队应采用梅花形布置方式，钢管规格宜选用  $\Phi 108 \times 6$  mm 热轧无缝管，环向间距控制在 40 cm，以保证支护拱体的连续性。钻孔施工时可采用双钻机对称作业，减少地层扰动，提高成孔精度，钻孔角度保持与路线纵坡  $1^\circ$  至  $3^\circ$  的仰角，防止管棚出现下沉偏移。在注浆作业方面，应在拱脚至拱顶方向逐段注入水泥浆，形成由外向内逐步固结的稳定体。注浆压力控制在 0.5 ~ 2.0 MPa 之间，水灰比一般为 1:1，必要时根据地层渗透系数进行局部调整，确保浆液扩散半径达到管间距的 0.6 倍，使注浆体充分饱和。为防止浆液渗漏与孔洞形成，可在钢管前端间隔 20 cm 开设小孔，使浆液在压力作用下均匀扩散，从而提高固结均匀度。

施工过程中应在钻机定位、钻孔方向、钢管接长及密封连接等环节建立全过程控制机制，技术人员应定期检测钻孔偏差与注浆密实度，结合监测数据动态修正施工参数。在洞口浅埋偏压区域，还应在拱部范

围内加设钢筋笼以增强抗弯能力，使加固拱环在地层荷载变化时具备足够稳定性。这种主动加固的手段，让隧道开挖前即可形成坚固的防护屏障，为后续锚喷体系和二衬结构提供稳定的力学基础，实现浅埋软弱围岩段的安全高效施工。

### 2.2 系统锚杆喷射混凝土协同

锚杆承担主动加固功能，将围岩由松散体转变为整体受力体，改变原有的应力分布模式；喷射混凝土则构建外层承载壳体，形成柔性与刚性并存的支护体系<sup>[4]</sup>。这一技术的核心在于利用锚固力与喷层抗压强度的协同效应，使支护结构在早期阶段即具备抗变形能力，从而有效延缓围岩塑性区的扩展。

在实践层面，施工应以均匀受力、快速封闭、精确锚固为主线。锚杆布设宜采用梅花形布置，间距控制在 1.0 ~ 1.2 m 之间，锚固长度应延伸至稳定围岩区域，使应力传递更为充分。钻孔时可选用风动凿岩机配合导向套管，控制孔径与倾角偏差，确保锚杆轴线与围岩主应力方向一致。砂浆灌注阶段需关注稠度与流动性，通常水灰比控制在 0.45 ~ 0.5 之间，灌注完成后立即安装垫板和螺母，使锚杆端部产生预紧力，提升早期支护刚度。喷射混凝土施工应与锚杆安装保持时间衔接，混凝土采用湿喷工艺，喷射厚度宜为 6 ~ 10 cm，骨料粒径不大于 10 mm，以免影响喷射密实度。速凝剂掺量控制在 5% 以内，使混凝土在 5 分钟内初凝，保证早期封闭效果。

为实现锚杆与喷层的协同受力，应在钢拱架、钢筋网片与喷层间形成连续受力通道。喷层表面应保持与围岩贴合，避免产生空鼓，喷射角度保持  $90^\circ$ ，喷嘴距离控制在 0.8 ~ 1.0 m 范围，施工人员应以弧形移动方式均匀覆盖，减少厚度偏差。在偏压段或富水围岩中，应增加防水砂浆层并设反滤排水盲沟，避免渗水削弱黏结性能。监测阶段应持续采集锚杆应力与喷层变形数据，对支护体系的力学状态进行动态评估。这一协同体系，使隧道结构能在塑性阶段形成自稳机制，使浅埋软弱围岩段实现可控变形与稳定支护的双重目标。

### 2.3 洞口段偏压稳定控制施工

洞口段偏压稳定控制施工是浅埋软弱围岩隧道建设中结构安全的临界环节，偏压地段常因坡面荷载、地形不均或地质构造差异而形成非对称应力场，拱顶与边墙受力不均，易导致局部塌落、偏移和拱脚滑移<sup>[5]</sup>。偏压控制的关键在于调整力流、构建对称、强化边支，即利用结构补强与应力引导，使原本紊乱的应力状态恢复平衡。在偏压区形成的塑性区向浅侧发展更为迅

速, 施工措施应以加固、分压、减荷三项为核心目标, 实现结构应力与地层反力的匹配。

洞口段应优先建立刚柔结合的稳定体系, 钢筋混凝土套拱与预加固体共同承担初期荷载。施工团队在开挖前应布设大管棚与小导管组合加固层, 使偏压侧围岩具备足够的抗剪强度, 套拱位置宜向深处延伸 3~5 m 形成稳定过渡带, 混凝土强度等级不低于 C30, 厚度保持在 40 cm 以上, 以增强拱脚约束力。对于偏压侧边墙, 应在结构设计中增加钢拱架密度, 将间距由 1.0 m 缩至 0.5 m, 使支护刚度提高约 40%, 有效抵消不平衡荷载。在仰坡与边坡处理方面, 应在偏压方向设置抗滑桩及锚索框架, 加强土体与岩体的整体性, 防止滑移带贯通。锚索宜采用  $\Phi 25$  mm 高强钢绞线, 间距控制在 1.5 m, 锚固长度延伸至稳定层 1.0 m 以外, 预应力控制在 150~200 kN 之间, 使锚固结构具备主动受力功能。在偏压区地表渗水集中的位置, 应增设截排水沟与防渗帷幕, 降低地下水压力对偏压侧的削弱效应。拱顶支护则需在偏压控制中实现刚度与延性的协调, 施工中可采用钢拱架、喷射混凝土、系统锚杆复合结构, 使拱顶形成半封闭的受力拱环。喷射混凝土厚度保持在 8~10 cm, 速凝剂掺量控制在 4% 以内, 锚杆长度控制在 3 m 以上, 形成稳定的支护界面。

为防止开挖扰动扩大, 应采用短进尺弱爆破控制方法, 每循环进尺不超过 1 m, 爆破参数经现场测振结果实时调整。这种复合技术途径, 使偏压地段的围岩能在有限变形中逐渐实现自稳, 使浅埋隧道洞口段在复杂荷载作用下保持稳定。

#### 2.4 施工监测动态调整技术

施工监测动态调整技术体现了现代隧道工程由经验控制向信息化、数字化管理的转型, 浅埋软弱围岩隧道在开挖过程中处于应力重分布的非线性演化阶段, 任何支护滞后或参数偏差都会引发变形累积与塑性区扩展。动态监测技术的核心在于实时识别围岩应力状态与结构响应, 利用监测数据建立反馈回路, 使支护参数与开挖策略保持动态匹配, 实现从静态设计向自适应控制的跃升。

在具体实施中, 应构建多层次监测体系, 监测点布设应体现代表性与均匀性, 通常在拱顶、拱腰、拱脚及地表同步布控, 间距控制在 5~10 m, 确保数据连续。测量仪器宜采用自动收敛计、光纤应变计与全站仪组合, 数据采集周期可设定为 4 小时一次, 利用无线传输系统实时上传至项目数据中心。工程技术人员依据监测结果绘制变形曲线, 判断围岩状态是否稳定, 当沉降速率超过预警阈值 0.5 mm/d 时, 应立即启

动调整程序, 修正支护参数。在施工控制方面, 动态调整主要体现在进尺长度、支护时间与材料参数三个维度。若监测数据显示围岩变形趋于活跃, 应将进尺由 1.5 m 缩减至 1.0 m, 喷射混凝土厚度增加 2 cm, 并同步加密锚杆布置, 使拱环刚度提高 10%~15%。在注浆加固区, 应依据孔压变化调整注浆压力与扩散半径, 防止过压引起的局部松动。对监测数据波动明显的区段, 技术人员应实施短期密集测量, 增加频率至每 2 小时一次, 以便精确掌握变化趋势。信息化平台在动态调整中发挥核心作用, 建立 BIM+ 物联网监测系统, 可将各监测断面的数据自动汇总, 生成三维可视化模型。项目管理人员可以在终端实时查看隧道变形状态, 依据数据趋势制定调整指令, 实现监控量测与施工控制的同步联动。在洞口偏压区或富水段, 应加设孔隙水压力传感器与钢架应变计, 分析围岩应力重分布规律, 调整开挖顺序与支护厚度, 确保力学平衡稳定。

施工监测动态调整技术的价值在于使隧道结构的稳定判断由经验估测转向数据驱动, 经过实时感知、快速响应和参数修正, 施工团队能在复杂地质条件中维持围岩与支护的最优协调, 使浅埋软弱围岩隧道形成可控、可预测的安全体系。

#### 3 结束语

浅埋软弱围岩高速公路隧道的施工技术体系以精确测量、加固先行、支护优化和信息监测为核心支撑, 实现力学平衡与施工节奏的动态匹配。各环节在统一调控框架下形成闭合反馈链, 使结构受力均化、变形可控、围岩稳定性显著增强。全过程监测与参数修正机制的融入, 使隧道工程在复杂地质条件下保持安全韧性, 确保施工过程的科学化。

#### 参考文献:

- [1] 孙成海. 山区高速公路浅埋软弱围岩隧道沉降变形开裂处治施工技术[J]. 交通科技与管理, 2024, 05(07): 133-135.
- [2] 李兵兵. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工工艺[J]. 四川建材, 2023, 49(06): 75-77.
- [3] 姜健, 徐华, 韩富庆, 等. 隧道浅埋段软弱围岩高压旋喷桩地表加固机理及现场试验方案设计[J]. 公路, 2022, 67(08): 403-409.
- [4] 郑明波. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工技术的实施[J]. 交通世界, 2021(10): 110-111.
- [5] 马晓文. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工技术[J]. 工程技术研究, 2021, 06(01): 63-64.