

浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术分析

曹铁锤

浙江交工集团股份有限公司第四分公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2026010018

摘 要 : 浅埋偏压软弱围岩隧道因地质条件复杂、施工风险高, 成为隧道工程领域的重难点课题。本文结合工程实践, 分析浅埋偏压软弱围岩的地质特性与施工难点, 阐述超前支护、开挖支护、防排水等关键施工技术的应用要点, 探讨施工过程中的质量控制与安全管理措施, 旨在为同类隧道工程提供技术参考, 提升施工效率与工程安全性。

关 键 词 : 浅埋偏压; 软弱围岩; 隧道施工; 超前支护; 质量控制

Analysis of Construction Technology for Tunnels in Shallow-Buried, Overburdened, Weak Surrounding Rock Conditions

Cao Tiechui

Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd. Fourth Branch Company, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Due to the complex geological conditions and high construction risks, tunnels in soft and overburdened shallow-buried rock formations have become a key and challenging issue in the field of tunnel engineering. This paper, based on engineering practice, analyzes the geological characteristics and construction difficulties of shallow-buried and overburdened soft rock formations, elaborates on the application points of key construction techniques such as advanced support, excavation support, and waterproofing and drainage, and discusses the quality control and safety management measures during the construction process. The aim is to provide technical references for similar tunnel projects, and improve construction efficiency and engineering safety.

Keywords : shallow-buried and overburdened; soft rock formations; tunnel construction; advanced support; quality control

前言

随着我国交通基础设施建设向山区、丘陵地带延伸, 浅埋偏压软弱围岩隧道的建设需求日益增长。此类隧道通常穿越第四系松散土层、强风化岩层, 具有围岩自稳能力差、开挖后易坍塌变形、偏压荷载作用明显等特点, 若施工方案不合理, 极易引发塌方、地表沉降超限等工程事故。近年来, 国内外学者针对浅埋偏压软弱围岩隧道施工开展了大量研究, 提出了新奥法、盾构法等多种施工理念, 但在具体工程实践中, 仍需结合地质条件、周边环境等因素进行技术优化。本文立足于工程实际, 系统梳理浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术体系, 从地质勘察、方案设计到现场施工、质量管控进行全面分析, 以期为工程建设提供切实可行的技术方案, 推动隧道施工技术的创新与发展。^[1]

一、浅埋偏压软弱围岩隧道的地质特性与施工难点

(一) 地质特性分析

浅埋偏压软弱围岩隧道的核心地质特征体现在埋深浅、围岩弱、偏压显著三个方面。埋深通常小于隧道跨度的5倍, 围岩多为粉质黏土、淤泥质土、强风化页岩等, 其黏聚力低、内摩擦角小, 岩体完整性差, 呈松散状或碎裂状结构, 自稳时间极短, 开挖后若无及时支护, 易发生塑性变形甚至坍塌。偏压荷载的形成主要源于地形起伏、地层倾斜或隧道两侧围岩厚度不均, 导致隧道结构承受不对称的侧向压力, 这种偏压作用会使支护结构产生

不均匀受力, 进而引发衬砌开裂、拱顶下沉等病害。此外, 软弱围岩往往富含地下水, 地下水的渗流会降低围岩的力学性能, 加剧围岩软化和泥化, 进一步增大施工难度。^[2]

(二) 核心施工难点

(1) 围岩稳定性控制难

软弱围岩自稳能力差, 浅埋条件下开挖扰动易传递至地表, 引发地表沉降, 若沉降量过大, 会危及周边建筑物、道路管线的安全。同时, 偏压荷载的存在使隧道围岩应力分布不均, 易在隧道偏压侧形成应力集中区, 导致围岩变形速率加快, 支护结构受力恶化。

（2）支护结构设计施工难

传统的支护体系难以适应浅埋偏压的复杂受力环境，需兼顾围岩加固与偏压平衡双重目标。支护结构的刚度、强度需合理匹配，若支护强度不足，无法抵御围岩压力；若刚度太大，则会导致支护结构自身承受过大荷载，引发开裂破坏。此外，支护施工的时机把控至关重要，过早支护会限制围岩的应力释放，过晚支护则无法阻止围岩变形，需精准掌握“适时支护”的原则。

（3）防排水施工难度大

软弱围岩中的地下水不仅会软化围岩，还可能引发突水、涌泥等灾害。浅埋隧道的防排水系统需同时兼顾围岩排水与地表防渗，若排水不畅，地下水会在支护结构后积聚，产生静水压力，破坏支护体系；若地表防渗不到位，雨水下渗会进一步恶化围岩条件，形成恶性循环。

（4）施工监测与风险预警难

浅埋偏压软弱围岩隧道的围岩变形具有速率快、变形量大、持续时间长的特点，对施工监测的精度和频率要求极高。需布设拱顶下沉、周边收敛、地表沉降等多项监测指标，但由于施工现场环境复杂，监测设备易受施工扰动影响，数据采集难度大。同时，如何根据监测数据准确判断围岩稳定性，及时发出风险预警，也是施工中的一大难点。

二、浅埋偏压软弱围岩隧道关键施工技术

（一）超前支护技术

超前支护是浅埋偏压软弱围岩隧道施工的核心前置技术，其作用是在隧道开挖前，对掌子面前方及周边围岩进行预加固，提高围岩自稳能力，防止开挖过程中发生坍塌。常用的超前支护技术主要包括超前小导管注浆支护、管棚支护、超前锚杆支护等，需结合围岩条件选择合适的支护方式。^[3]

（1）超前小导管注浆支护

适用于围岩破碎但仍有一定自稳能力的地层。施工时，沿隧道拱部轮廓线外10–15cm的位置，以10°–30°的外插角钻孔，插入直径42–50mm的小导管，导管长度一般为3.5–5.0m，环向间距30–50cm。随后通过小导管向围岩注入水泥浆或水泥–水玻璃双液浆，浆液渗透到围岩裂隙中，胶结松散岩体，形成具有一定强度的“注浆加固圈”，有效提高围岩的整体性和自稳能力。该技术施工灵活、成本较低，在浅埋偏压软弱围岩隧道中应用广泛。

（2）管棚支护

适用于围岩极其破碎、自稳能力极差的浅埋隧道，尤其是洞口段、偏压严重段。管棚支护采用直径较大的钢管（一般为89–159mm），沿隧道拱部轮廓线外布设，钢管长度可达10–40m，通过钻机将钢管顶入围岩，形成“管棚棚架”，为开挖作业提供强大的超前支护作用。管棚可分为长管棚和短管棚，长管棚多用于洞口浅埋段，短管棚则适用于洞内局部破碎带。管棚施工后，可在钢管内注浆，进一步增强加固效果，有效控制围岩变形和地表沉降。

（3）超前锚杆支护

适用于围岩相对完整、偏压较小的浅埋隧道。超前锚杆采用

直径22–25mm的螺纹钢，长度3–4m，环向间距40–60cm，外插角10°–20°，通过钻孔植入围岩，利用锚杆的抗拉拔力约束围岩变形。该技术施工简便、速度快，但加固范围有限，通常与喷射混凝土配合使用，形成联合支护体系。^[4]

（二）开挖支护、防排水及信息化施工技术

开挖方式与支护时机直接影响浅埋偏压软弱围岩隧道施工安全，需遵循“短进尺、弱爆破、快支护、勤量测”原则，结合BIM模拟优化方案，降低围岩扰动。

（1）开挖方法

优先采用台阶法、CD法（中隔壁法）、CRD法（交叉中隔壁法）等分部开挖方法。施工前通过BIM技术构建三维地质模型，模拟不同方案下围岩应力分布与变形趋势，优化开挖参数。台阶法分上下台阶施工，上台阶高2.5–3.5m，采用微震爆破、机械或静态开挖，开挖后及时施作初期支护，下台阶在初期支护稳定后开挖，台阶长度控制在5–10m；偏压严重隧道采用不对称台阶法，通过BIM模拟调整偏移量，或模拟偏压挡墙与明洞长度设置方案。CD法、CRD法适用于围岩稳定性极差的情况，将断面划分为小断面分部开挖，完成后立即施作初期支护，CRD法增设临时仰拱，支护效果更优，可通过BIM优化工序衔接提升效率。^[5]

（2）初期支护技术

采用“喷射混凝土+锚杆+钢筋网+钢拱架”联合支护体系。喷射混凝土选用早强型，强度不低于C25，厚度10–20cm，确保与围岩紧密贴合；系统锚杆长度2.5–3.5m，间距1.0–1.5m，与钢拱架协同提升整体性；钢筋网采用 $\phi 6$ –8mm钢筋，网格间距20×20cm，增强抗裂性；钢拱架选用工字钢或格栅钢架，间距0.5–1.0m，拱脚需落于坚实地基，必要时设垫板。通过BIM技术模拟钢拱架安装位置与角度，生成施工指导文件保障精度。

（3）二次衬砌技术

作为永久支护结构，需在初期支护变形稳定后施作，采用强度不低于C30的模筑混凝土，厚度30–50cm。施工前通过BIM模型核对初期支护表面平整度，规划防水板铺设与浇筑顺序，清理初期支护表面后铺设防水板。浇筑采用泵送混凝土，确保振捣密实；偏压隧道需加厚偏压侧衬砌或采用不对称结构，通过BIM模拟验证受力合理性。

（三）防排水施工技术

遵循“防、排、截、堵相结合，因地制宜，综合治理”原则，构建完善体系。围岩排水方面，超前小导管设透水孔，开挖后在初期支护背后布设环向（间距5–10m）与纵向盲管（直径 ≥ 100 mm），通过三通连接引入中央排水管排出。防水施工中，二次衬砌与初期支护间铺设 ≥ 1.5 mm厚EVA或HDPE防水板，搭接宽度 ≥ 10 cm，采用热焊法焊接；施工缝设中埋式止水带，变形缝设橡胶止水带，通过BIM技术标注安装要求。地表防渗需设置截排水沟，回填封堵地表裂缝，必要时进行地表注浆，利用BIM模型优化布设范围与走向。

（四）信息化施工技术

（1）BIM模拟施工技术

施工准备阶段整合地质勘察数据与设计图纸，构建包含地

质、支护、防排水系统的全要素三维模型。模拟施工全过程预判坍塌、受力超限等风险，优化方案；施工中对比现场实际数据与模型，动态调整参数，实现闭环管理；同时利用模型进行技术交底，直观展示施工流程与关键要求。

（2）物联网监测技术

构建智能监测系统，在隧道拱顶、边墙等位置布设传感器，实时采集拱顶下沉、应力、渗压等数据，监测频率可自动调整，变形速率大时实现分钟级采集。数据通过无线传输上传云端平台，实时分析绘制曲线，超预警值时自动通过短信、弹窗预警，同时监控施工设备运行状态与人员定位，保障安全。

三、浅埋偏压软弱围岩隧道施工质量控制与安全管理

（一）施工质量控制要点

（1）原材料质量控制：严格把控水泥、钢筋、砂石等原材料的进场质量，所有材料需具备出厂合格证，并进行抽样检测，不合格材料严禁使用。喷射混凝土、模筑混凝土的配合比需通过试验确定，严格按照配合比计量拌合，确保混凝土强度满足设计要求。利用 BIM 模型关联原材料信息，实现材料进场、使用全过程可追溯。

（2）施工工序质量控制：超前支护施工时，通过物联网监测设备控制小导管、管棚的钻孔角度、间距、长度，采用注浆压力传感器实时监测注浆压力，确保注浆饱满，加固效果达标；开挖施工时，严格控制进尺长度和爆破参数，通过 BIM 模型比对开挖轮廓线，避免超挖或欠挖；初期支护施工时，利用激光测距仪、倾角仪确保钢拱架安装垂直度、间距符合设计要求，采用厚度检测仪检测喷射混凝土厚度均匀性；二次衬砌施工时，控制模板安装精度，通过 BIM 模型校验衬砌厚度和表面平整度。^[6]

（3）质量检测：定期对支护结构进行质量检测，采用超声波检测、回弹法等手段检测喷射混凝土和二次衬砌的强度与密实度；对锚杆进行拉拔试验，检验锚杆的抗拉拔力；对防水板焊缝进行气密性试验，确保防水效果。将检测数据录入 BIM 模型，形成质量检测数据库，实现质量问题的溯源与整改跟踪。

（二）施工安全管理措施

（1）施工监测优化：在传统监测基础上，融合物联网监测技术，建立完善的施工监测体系，实现监测数据的实时采集、传输、分析与预警。监测点布设需结合 BIM 模型优化，确保监测数据能全面反映围岩及支护结构的受力变形状态。及时对监测数据进行分析处理，预测围岩变形趋势，若变形量超过预警值，立即停止施工，采取注浆加固、回填封堵等加固措施。

（2）风险预警与应急处置：基于 BIM 模拟结果和物联网监测数据，制定专项应急预案，针对塌方、突水涌泥、地表沉降超限等风险，储备应急物资和设备，定期组织应急演练。建立多级风险预警机制，根据监测数据偏差程度划分预警等级，明确不同等级的处置流程。一旦发生险情，立即启动应急预案，通过人员定位系统快速疏散施工人员，利用 BIM 模型辅助制定抢险方案，采取有效措施控制险情发展。

（3）现场安全管理：加强施工现场的安全防护，设置警示标志和防护栏杆；规范施工人员的操作行为，佩戴安全帽、安全带等防护用品；严格控制隧道内的施工荷载，避免超载导致支护结构破坏；加强通风、照明管理，改善作业环境，防止发生中毒、窒息等事故。利用物联网技术对施工现场的安全隐患进行实时巡查，发现问题及时推送至相关责任人，督促整改闭环。

四、结语

浅埋偏压软弱围岩隧道施工是一项集地质分析、技术优化、质量管控于一体的系统工程，其核心在于根据围岩特性选择合适的施工技术，实现对围岩稳定性的有效控制。本文通过分析此类隧道的地质特性与施工难点，阐述了超前支护、开挖支护、防排水等关键技术的应用要点，提出了质量控制与安全管理措施。实践表明，只有坚持“因地制宜、动态调整”的原则，将理论分析与工程实践相结合，才能有效降低施工风险，确保隧道工程的安全、高效建设。随着隧道施工技术的不断创新，新型材料、智能化设备的应用将为浅埋偏压软弱围岩隧道施工提供更多解决方案，推动行业朝着高质量发展方向迈进。

参考文献

- [1]王梦恕.隧道工程[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [2]张顶立,李鹏飞,黄俊.软弱围岩隧道变形特性与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3567-3578.
- [3]中华人民共和国交通运输部.JTG/T 3370.1-2020 公路隧道施工技术规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [4]刘招伟,郭小红,谭忠盛.浅埋偏压隧道施工围岩稳定性分析及控制技术[J].铁道工程学报,2019,36(05):74-79.
- [5]李永林,朱合华,李晓军.软弱围岩隧道超前支护效果评价方法研究[J].岩土工程学报,2021,43(03):512-519.
- [6]陈秋南,王曙光,张永兴.公路隧道浅埋偏压段施工技术与数值模拟[J].重庆大学学报,2017,40(09):98-105.