

隧道施工中的浅埋偏压软弱围岩技术研究

胡贤成

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/UAID.2025020030

摘 要 : 浅埋偏压软弱围岩隧道的施工需要综合考虑地质条件、施工方法和支护措施。通过采用分步开挖、超前支护、加强初期支护和信息化施工等技术手段,可以有效控制围岩变形,确保施工安全。在实际工程中,应根据具体情况进行动态设计和施工调整。本文针对浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术进行了系统研究,提出了相应的施工技术方案和支护措施。

关 键 词 : 浅埋隧道; 偏压; 软弱围岩

Research on Shallow-Buried Partial Pressure Weak Surrounding Rock Technology in Tunnel Construction

Hu Xiancheng

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : The construction of shallow-buried tunnels with partial pressure in weak surrounding rock requires a comprehensive consideration of geological conditions, construction methods and support measures. By adopting technical means such as step-by-step excavation, advanced support, enhanced initial support and information-based construction, the deformation of surrounding rock can be effectively controlled and construction safety can be ensured. In actual engineering, dynamic design and construction adjustments should be made based on specific circumstances. This paper conducts a systematic study on the construction technology of shallow-buried tunnels with partial pressure and weak surrounding rock, and proposes corresponding construction technical schemes and support measures.

Keywords : shallow-buried tunnel; bias voltage; weak surrounding rock

前言

随着我国基础设施建设的快速发展,隧道工程在交通、水利等领域得到了广泛应用。然而,在复杂地质条件下,特别是浅埋偏压软弱围岩条件下的隧道施工面临着诸多挑战。这类隧道由于埋深浅、围岩强度低、存在偏压等特点,容易发生围岩失稳、地表沉降等问题,给施工安全带来严重威胁。因此,研究浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术具有重要的理论和实践意义。

浅埋偏压软弱围岩隧道具有以下显著特点:首先,隧道埋深较浅,一般小于2倍洞径,这使得地表荷载对隧道的影响更为直接。其次,由于地形或地质构造的原因,隧道两侧承受不对称的压力,形成偏压状态。第三,围岩强度低,自稳能力差,容易发生塑性变形和破坏。最后,这类隧道对地表沉降敏感,施工过程中需要严格控制变形。

一、浅埋偏压软弱围岩隧道地质勘察与超前地质预报

准确掌握地质条件是保障施工安全的前提,需通过精细化勘察与超前预报,为施工方案制定提供依据。

(一) 地质勘察技术要点

地质勘察需明确围岩性质、埋深、偏压程度及地下水分布,为施工方案设计奠定基础。

勘察内容与方法:采用钻探(钻孔深度需超过隧道底板5m)、物探(地质雷达、地震波反射法)结合现场试验的方式,重点查明围岩级别、岩体完整性系数(K_v 值多 <0.4)、天然含水率(软土类可达30%以上)及软弱夹层分布。例如:某隧道通

过地质雷达探测,发现掌子面前方15m处存在一条富水断层破碎带,为超前治水方案提供了精准依据。同时,针对浅埋特性,需加密地表勘察点,测量范围延伸至隧道中线两侧各50m,绘制详细的地形等高线图,计算偏压系数(横向压力与垂直压力比值),某隧道偏压系数达0.6,远超一般隧道的0.2-0.3范围,需专项设计抗偏压支护。^[1]

室内试验参数:对取土样进行物理力学试验,测定天然重度(软黏土多为 $18-20\text{kN/m}^3$)、黏聚力(通常 $<20\text{kPa}$)、内摩擦角(多 $<15^\circ$)等指标。某隧道粉质黏土围岩试验显示,黏聚力仅 12kPa ,内摩擦角 8° ,据此设计了超前注浆参数(注浆压力 1.2MPa),确保加固后围岩强度提升至黏聚力 30kPa 以上。

（二）超前地质预报技术应用

超前地质预报可提前发现掌子面前方不良地质体，为风险防控争取时间。

预报方法选择：短距离预报（3–5m）采用掌子面地质素描结合超前水平钻探（孔径50mm）；中长距离预报（10–30m）采用地质雷达（主频100–500MHz）或地震波CT。某隧道施工中，地质雷达探测发现K0+210–K0+225段存在强反射信号，结合超前钻探证实为富含砾土层，提前采取了注浆堵水措施。对于软弱夹层发育段，辅以红外探水仪，探测距离3–5m，分辨率0.1m，某隧道通过红外探测发现掌子面右侧2m处有水体富集，提前打设排水孔降压。^[2]

预报频率与反馈：每循环开挖前必须进行超前预报，预报结果需及时反馈至施工方案。某隧道Ⅴ级围岩段每5m进行一次地质雷达扫描，发现K0+180段围岩含水率突增后，立即将开挖循环进尺从0.5m缩短至0.3m，并增加小导管注浆数量（从每环30根增至45根）。

（三）施工方案设计原则

施工方案需遵循“先护后挖、短进尺、强支护、快封闭”原则，结合地质条件动态调整。

开挖方法选择：Ⅴ级围岩及偏压严重段优先采用CRD法（交叉中隔壁法）或双侧壁导坑法；Ⅳ级围岩可采用台阶法加临时仰拱。例如：某双向四车道隧道因断面大（宽14m）、偏压明显，选用双侧壁导坑法，通过先开挖两侧导坑形成“反压”，有效平衡了山体推力。同时，对偏压侧导坑采用“早开挖、强支护”策略，某隧道左侧偏压段，左侧导坑比右侧提前3个循环开挖，支护强度提高20%（钢拱架型号从I22a升级为I25a）。^[3]

支护参数设计：初期支护需强化刚度，钢拱架选用I22a–I25a工字钢，喷射混凝土厚度 $\geq 25\text{cm}$ ，锚杆长度 $\geq 4\text{m}$ （破碎带需加长至5m）。某隧道偏压段设计中，右侧拱腰增设2排 $\Phi 25$ 锁脚锚杆，长度5m，与钢拱架焊接形成整体，同时在拱脚设置 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 钢垫板，扩大受力面积，避免拱脚陷入软弱围岩。

二、浅埋偏压软弱围岩隧道核心施工技术应用

施工过程需通过精细化操作控制围岩扰动，重点把控开挖、支护、超前加固及防排水等环节。

（一）开挖施工技术

开挖方式直接影响围岩稳定性，需采用分步开挖、短循环进尺，减少对围岩的扰动。

CRD法施工要点：将隧道断面分为4个导坑（左上、右上、左下、右下），依次开挖并及时支护，相邻导坑开挖间距 $\geq 5\text{m}$ 。某隧道CRD法施工中，左上导坑开挖后1小时内完成钢拱架架设，喷射25cm厚C25混凝土，24小时内封闭成环，单循环进尺控制在0.5m。为平衡偏压，对右侧导坑采用“短台阶”开挖（台阶高度2m），左侧采用“长台阶”（台阶高度3m），利用左侧岩体自重抵消部分偏压。

双侧壁导坑法应用：适用于断面大、偏压严重的隧道，先开

挖两侧导坑（宽度3–4m），完成支护后再开挖中岩柱和核心土。某三车道隧道采用双侧壁导坑法，侧壁导坑宽度3.5m，高度5m，每循环开挖0.5m，中岩柱保留宽度2m，导坑初期支护采用I25a钢拱架+30cm厚喷射混凝土，导坑底部设10cm厚C20混凝土垫层，防止底鼓。

（二）超前加固与支护技术

超前加固可提高围岩自稳能力，初期支护需快速形成承载结构，抵御围岩压力。

管棚与小导管超前支护：浅埋段采用大管棚（ $\Phi 108\text{mm}$ ，长度15–30m），环向间距40cm，管内注水泥–水玻璃双液浆（水灰比1:1）。某隧道进口段埋深10m，采用 $\Phi 108\text{mm}$ 管棚超前支护，长度20m，环向间距40cm，管内注水泥–水玻璃双液浆，注浆压力从0.5MPa逐步升至1.2MPa，形成坚固的“棚架”结构，开挖后围岩无明显变形。对于局部破碎带，采用 $\Phi 42\text{mm}$ 小导管（长度4.5m）补充加固，外插角 10° – 15° ，某隧道断层段每环打设48根小导管，注浆后形成2m厚加固圈。^[4]

初期支护施工细节：钢拱架安装前需放线定位，采用全站仪控制中线偏差 $\leq 5\text{cm}$ ，高程偏差 $\leq 3\text{cm}$ ，每榀钢拱架之间用 $\Phi 22$ 纵向连接筋焊接（间距1m），形成整体框架。某隧道施工中，发现相邻钢拱架间距偏差达10cm，立即拆除返工，避免出现应力集中。喷射混凝土采用湿喷工艺，坍落度控制在8–12cm，分层喷射（每层5–10cm），初凝后立即喷水养护，某工程通过湿喷技术使混凝土强度达标率从85%提升至98%。

（三）防排水施工技术

地下水会加剧软弱围岩软化，需构建“防、排、截、堵”相结合的防排水体系。

地表排水措施：浅埋段需在隧道上方设置截水沟（截面尺寸 $50\text{cm} \times 60\text{cm}$ ）、急流槽，将地表水引至隧道影响范围外。某隧道进口段地表坡度 30° ，设置了三道截水沟，间距10m，采用M7.5浆砌片石砌筑，底部设10cm厚C15混凝土垫层，防止渗水冲刷边坡。同时，对地表裂缝采用黏土回填夯实（压实度 $\geq 90\%$ ），某隧道通过地表处理，使渗入隧道的水量减少60%。

洞内排水系统：掌子面设集水井（尺寸 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$ ），采用潜水泵将水排至洞外沉淀池（容量 $\geq 100\text{m}^3$ ）。某富水隧道配置了3台备用泵（扬程50m，流量 $50\text{m}^3/\text{h}$ ），形成“多泵接力”排水系统，确保突水时排水能力充足。结构防排水方面，初期支护与二次衬砌间铺设1.5mm厚PVC防水板（搭接宽度 $\geq 10\text{cm}$ ，热熔焊接），施工缝设中埋式止水带（宽度30cm），某隧道防水板施工中，采用双缝焊接工艺，充气检测压力保持0.2MPa，5分钟内压降 $\leq 20\%$ ，确保无渗漏。

（四）二次衬砌施工技术

二次衬砌需在围岩变形稳定后施工，作为永久承载结构，需保证施工质量。

施工时机判断：通过监测数据确定，当拱顶下沉速率 $\leq 0.1\text{mm/d}$ 、水平收敛速率 $\leq 0.05\text{mm/d}$ 时方可施工。某隧道偏压段在变形稳定后（累计沉降52mm，连续7天无增长）进行二次衬砌，采用C30防水混凝土，厚度50cm。为应对偏压，二次衬

砌在偏压侧增设纵向加强钢筋（ $\Phi 25@20\text{cm}$ ），形成偏心受压构件，某隧道二次衬砌偏压侧钢筋用量比另一侧增加30%。

浇筑与养护要点：采用整体钢模板台车（刚度满足要求，变形 $\leq 1.5\text{mm/m}$ ），分层浇筑（厚度 $\leq 30\text{cm}$ ），插入式振捣器振捣至混凝土表面泛浆。某工程二次衬砌施工中，预埋测温管控制内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，洒水养护14天，同时在偏压侧增设5个观测点，监测衬砌应力变化，确保其工作状态正常。

三、浅埋偏压软弱围岩隧道施工监测与风险控制

施工监测是掌握围岩与支护状态的重要手段，需通过实时监测数据指导施工，及时预警风险。

（一）监测项目与频率

监测需覆盖围岩变形、支护应力等关键指标，频率随施工阶段动态调整。

必测项目与方法：包括拱顶下沉（水准仪，精度 0.1mm ）、净空变化（收敛计，精度 0.01mm ）、地表沉降（监测点间距 $5\sim 10\text{m}$ ，埋深 $< 20\text{m}$ 时需测至隧道外 50m ）。某隧道浅埋段地表沉降监测显示， $K0+150$ 段最大沉降 38mm ，位于隧道轴线正上方，而偏压侧（右侧）地表沉降比左侧大 12mm ，反映出偏压作用的影响。此外，需增设支护应力监测（钢拱架应力采用振弦式传感器，每10榀布设一个监测断面），某隧道右侧钢拱架应力达 180MPa ，接近屈服强度（ 235MPa ），及时采取了加固措施。

监测频率控制：开挖面距监测断面 $< 5\text{m}$ 时，1次/2小时； $5\sim 10\text{m}$ 时，1次/天； $> 10\text{m}$ 且变形稳定后，1次/3天。某隧道V级围岩段因变形速率达 1mm/d ，将监测频率加密至1次/小时，持续跟踪围岩状态，直至速率降至 0.3mm/d 以下。^[4]

（二）监测数据处理与预警

通过数据分析判断结构稳定性，建立分级预警机制，及时采取应对措施。

数据处理方法：采用回归分析（如指数曲线法）预测最终变形，当预测值超过允许值（如拱顶下沉允许值 100mm ）时预警。某隧道监测数据显示，拱顶下沉预测值达 110mm ，立即启动预警。同时，绘制变形-时间曲线，分析变形速率变化，某隧道曲线出现“反弯点”（速率由减变增），判断为围岩失稳前兆，立即停工处理。

分级预警响应：设置三级预警（黄色：监测值达允许值

70%；橙色：85%；红色：100%）。某隧道进口段出现橙色预警后，暂停开挖，采取加密钢拱架（间距从 60cm 缩至 50cm ）、增设 $\Phi 25$ 锚杆（长度 5m ）等措施，3天后变形速率降至 0.3mm/d 。对于偏压引起的不对称变形（如右侧收敛比左侧大50%），需单独制定预警阈值，某隧道偏压侧预警值比另一侧降低15%，确保提前干预。^[5]

（三）常见风险及防治措施

针对塌方、支护开裂、突水等常见风险，需制定专项防治措施。

塌方防治：开挖前检查掌子面，发现掉块、渗水异常时停工，采用超前注浆加固。某隧道掌子面出现纵向裂缝，立即打设 $\Phi 50\text{mm}$ 超前锚杆（长度 3m ），注浆后以 0.3m 循环进尺开挖，避免塌方。对于浅埋段，可采用地表注浆（袖阀管注浆，间距 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ）提前加固围岩，某隧道通过地表注浆，使拱顶下沉量减少40%。

偏压导致支护开裂处理：当初期支护裂缝宽度 $> 3\text{mm}$ 时，采用“临时支撑+侧向注浆”调整应力。某隧道右侧拱腰裂缝达 4mm ，立即架设I20a临时横撑（间距 2m ），向左侧围岩注浆（压力 1.0MPa ），5天后裂缝稳定。同时，在裂缝处埋设应力传感器，监测裂缝发展趋势，确保支护结构安全。^[6]

突水突泥应对：富水段施工前备足排水设备（排水能力需超预测涌水量1.5倍），发现突水时立即撤离人员，启动排水系统。某隧道断层破碎带突水（涌水量 $50\text{m}^3/\text{h}$ ），启用2台 22kW 水泵排水，同时打设止水帷幕注浆堵水，3天后涌水量控制在 $5\text{m}^3/\text{h}$ 以内。对于泥质围岩，需提前储备速凝混凝土（初凝时间 $< 5\text{min}$ ），某隧道突泥时，快速喷射速凝混凝土封闭掌子面，阻止泥流扩散。

四、结束语

浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术的核心在于“适应地质、动态调整”。本文通过分析地质勘察、核心施工技术及监测控制要点，结合工程案例总结了技术经验：精准的地质预报是前提，需通过多手段勘察明确围岩参数与偏压特性；分步开挖与强支护是关键，CRD法、双侧壁导坑法等工法能有效控制围岩扰动，超前加固与防排水技术可提升围岩稳定性；实时监测与风险预警是保障，通过分级预警与专项措施能及时化解塌方、突水等风险。

参考文献

- [1] 杨永斌,等.浅埋软弱围岩隧道微桩锁脚施工技术研究[J].路基工程,2023,(4):246-251.
- [2] 张进步.破碎岩体对低山区隧道工程施工的影响[J].福建建材,2022(11):76-78.
- [3] 王伟,杨转运,易丽云,等.浅埋偏压隧道口的软弱围岩综合加固处治研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(6):80-85.
- [4] 刘翔,等.浅埋偏压隧道在变坡面下围岩压力计算分析[J].铁道科学与工程学报,2024,21(3):674-681.
- [5] 吴逆.偏压隧道施工技术探讨[J].门窗,2017(03):93.
- [6] 邱业建,等.浅埋偏压软弱围岩段隧道施工技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1):13-18.