

浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术研究

苏浙

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/UAID.2025020034

摘 要： 浅埋偏压软弱围岩隧道因其地质条件复杂、施工难度大、风险系数高，一直是隧道工程领域的重点研究对象。本文以实际工程案例为依托，通过分析多个典型项目的施工数据与技术应用效果，系统探讨浅埋偏压软弱围岩的地质特性、关键施工技术及风险控制策略。研究表明，针对性的超前支护、合理的开挖工法选择及动态监控量测体系，是保障此类隧道施工安全与效率的核心手段。本文可为同类工程提供技术参考与实践指导。

关 键 词： 浅埋偏压；软弱围岩；隧道施工；超前支护；监控量测；案例分析

Research on Construction Technology of Shallow-Buried Tunnels with Partial Pressure and Weak Surrounding Rock

Su Zhe

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

Abstract： Shallow-buried tunnels with biased pressure and weak surrounding rock have always been a key research object in the field of tunnel engineering due to their complex geological conditions, high construction difficulty and high risk coefficient. Based on actual engineering cases, this paper systematically explores the geological characteristics, key construction techniques and risk control strategies of shallow-buried and biased weak surrounding rock by analyzing the construction data and technical application effects of multiple typical projects. Research shows that targeted advanced support, reasonable selection of excavation methods and dynamic monitoring and measurement systems are the core means to ensure the safety and efficiency of such tunnel construction. This article can provide technical references and practical guidance for similar projects.

Keywords： shallow-buried bias pressure; weak surrounding rock; tunnel construction; advanced support; monitoring and measurement; case analysis

前言

随着我国交通网络向山区、丘陵地带延伸，穿越浅埋、偏压、软弱围岩地段的隧道工程日益增多。这类隧道由于埋深浅（通常小于2倍洞径）、围岩强度低（单轴抗压强度多低于5MPa）、存在显著不对称荷载，施工过程中易出现拱顶坍塌、结构变形超标、涌水突泥等问题。据统计，2018–2023年我国公路隧道施工事故中，42%发生在浅埋偏压软弱围岩段，平均每起事故造成直接经济损失超600万元，工期延误30–90天。

例如：2021年某省高速公路隧道K23+150段施工时，因对浅埋偏压条件下的围岩变形特性预判不足，初期支护未及时跟进，导致掌子面坍塌，塌方体体积达800m³，造成3名施工人员受伤，直接经济损失1200万元，工期延误45天。因此，深入研究浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术，对提升工程安全性、保障施工进度具有重要现实意义。本文结合国内10余个典型工程案例，从地质特性、关键施工技术及风险控制三个方面展开研究，每个论点均辅以具体工程实例与数据支撑。

一、浅埋偏压软弱围岩的地质特性及对施工的影响

（一）埋深与围岩自稳能力非线性关联

浅埋隧道的围岩自稳能力并非随埋深增加呈线性提升，当埋深小于1.5倍洞径时，围岩难以形成有效自然拱，荷载直接作用于

支护结构，自稳能力急剧下降。

例如：某高速公路隧道左线进口段，洞径12m，埋深分别为6m（0.5倍洞径）、10m（0.83倍洞径）、18m（1.5倍洞径）的三段施工对比显示：埋深6m段开挖后，围岩无自稳时间，掌子面暴露10分钟即出现掉块；埋深10m段自稳时间约30分钟；

埋深18m段自稳时间达2小时，印证了埋深与自稳能力的非线性关系。；某铁路隧道浅埋段（埋深8m，洞径10m），围岩为强风化砂岩，单轴抗压强度3.2MPa，开挖后20分钟内拱顶下沉量达5cm，边墙收敛3cm，需立即进行初期支护，否则随时可能坍塌。^[1]

（二）偏压荷载致支护受力不对称

偏压荷载源于地形高差、地质构造或地表荷载差异，会使隧道结构产生不对称应力分布，导致一侧支护结构受力集中，易出现变形超标或局部破坏。

例如：某山区隧道K5+200段，因右侧山体高于左侧30m，形成明显偏压，偏压系数（最大侧荷载/最小侧荷载）达1.6。通过应力传感器监测发现：右侧拱脚压应力达280MPa，左侧仅120MPa，右侧拱架出现扭曲变形，最大变形量达8cm，不得不对右侧拱架进行加固处理（更换为更大型号工字钢）；某公路隧道出口段，因地表存在3m高的填方路堤，形成局部偏压，偏压系数1.4。施工中左侧边墙初期支护混凝土出现裂缝，裂缝最大宽度达3mm，经检测，左侧边墙应力达15MPa，超过C25混凝土设计抗压强度（17MPa）的88%，及时采取增设锚杆措施后，裂缝未进一步发展。^[2]

（三）软弱围岩遇水力学性能劣化

软弱围岩（如粉质黏土、淤泥质土、破碎页岩等）的黏聚力、内摩擦角等力学参数随含水率增加大幅下降，遇水后易软化、崩解，导致围岩自稳能力丧失。

例如：某隧道穿越第四系粉质黏土层，天然含水率18%时，黏聚力25kPa，内摩擦角12°；施工中遭遇突水，含水率升至35%，黏聚力降至8kPa（降幅68%），内摩擦角降至5°（降幅58%），掌子面出现大面积溜塌，塌方体体积达300m³；某地铁隧道区间，围岩为淤泥质黏土，施工中因降水不及时，掌子面含水率从20%升至28%，开挖后1小时内边墙出现塑性变形，最大位移达10cm，初期支护喷射混凝土出现大量龟裂，不得不暂停施工，采用管井降水至含水率15%以下才继续作业。

二、浅埋偏压软弱围岩隧道关键施工技术应用与效果

（一）超前支护需差异化选择

超前支护是控制浅埋偏压软弱围岩变形的关键，需根据埋深、围岩强度及偏压程度选择合适技术，管棚（长距离、高强度）与小导管（短距离、局部加固）组合应用可兼顾安全性与经济性。例如：某高速公路隧道浅埋偏压段（埋深7m，偏压系数1.3，围岩为粉质黏土），采用“Φ108mm管棚（长20m，环向间距40cm）+Φ42mm小导管（长5m，环向间距30cm）”组合超前支护：管棚注浆后形成刚度较大的超前承载拱，小导管对管棚之间的围岩进行补充加固，施工中拱顶下沉量控制在8cm以内，边墙收敛5cm，较单纯采用管棚支护（拱顶下沉15cm）效果提升47%；某铁路隧道进口段（埋深5m，围岩为砂层），初期仅采用小导管超前支护，因砂层自稳能力极差，小导管刚度不足，开挖后拱顶下沉达20cm；改为“管棚+小导管”组合支护后，拱顶下沉量降至6cm，有效控制了围岩变形。^[3]

（二）CRD工法控偏压变形更优

CRD工法通过将隧道分为多个小导洞分步开挖，及时封闭成

环，能有效抵抗偏压荷载，控制围岩变形，其效果显著优于台阶法。例如：某隧道浅埋偏压段（埋深9m，偏压系数1.5，围岩为破碎页岩）采用CRD工法与台阶法的对比施工显示：CRD工法施工段最大拱顶下沉8cm，边墙收敛5cm；台阶法施工段（同一地质条件）最大拱顶下沉22cm，边墙收敛15cm，CRD工法的变形控制效果更优；某公路隧道K3+100段，采用CRD工法施工，将隧道分为4个导洞，每个导洞开挖后立即施作初期支护并封闭成环，循环进尺控制在0.5m。监测数据显示，该段施工期间最大水平收敛速率为0.8cm/d，累计收敛量7cm，均在规范允许范围内；而相邻采用台阶法施工的段落，最大收敛速率达2.5cm/d，累计收敛18cm，超出规范限值（10cm）80%。

（三）初期支护需强化刚度与及时性

浅埋偏压软弱围岩隧道的初期支护必须具备高强度、高刚度，且需紧跟开挖面及时施作，“早强、快封”（快速形成封闭支护结构）是控制围岩变形的关键。例如：某隧道软弱围岩段（单轴抗压强度2.5MPa）施工中，初期采用常规C20喷射混凝土（24h强度10MPa），支护滞后开挖面3m，导致拱顶下沉达18cm；改为C25早强喷射混凝土（24h强度15MPa），支护滞后开挖面1m，拱顶下沉量降至7cm，证明了早强与及时性的重要性；某铁路隧道浅埋段，初期支护采用I20a工字钢（间距60cm）+双层钢筋网（Φ8mm，间距20×20cm）+25cm厚C25喷射混凝土，开挖后30分钟内完成初期支护封闭。监测显示，该段最大拱顶下沉5cm，边墙收敛3cm；而相邻段因工字钢间距放大至80cm，支护滞后1小时，最大拱顶下沉达12cm，验证了强化刚度与及时性的效果。

（四）二次衬砌适时施作保结构稳定

二次衬砌作为隧道永久承载结构，需在初期支护变形稳定后适时施作（通常当变形速率≤0.1-0.2mm/d时），且需针对偏压条件采用不对称配筋，确保结构长期安全。施作前需检查初期支护完整性（裂缝宽度≤0.2mm、变形收敛≥80%），采用模板台车浇筑（刚度≥20000kN·m/rad），混凝土强度≥C30，抗渗等级≥P8，偏压侧需增加纵向钢筋数量（较非偏压侧多20%-30%），并加密箍筋（间距10-15cm）。

例如：某隧道浅埋偏压段，初期支护变形稳定后（速率0.15mm/d）施作二次衬砌，偏压侧纵向钢筋采用Φ25mm（间距15cm），非偏压侧采用Φ22mm（间距20cm），混凝土浇筑后28天强度达35MPa，抗渗等级P10；监测显示，运营5年后衬砌最大压应力12MPa（设计限值15MPa），无裂缝产生。另一项目因过早施作二次衬砌（变形速率0.8mm/d），导致衬砌与初期支护间出现脱空（最大间隙5cm），后期不得不注浆填充，增加成本80万元。

三、浅埋偏压软弱围岩隧道施工风险控制技术

（一）监控量测加密预警控风险

浅埋偏压软弱围岩隧道的监控量测需扩大监测范围（地表至隧道底以下）、加密监测频率（1-2次/天），通过数据异常预警及时发现风险，避免事故发生。例如：某高速公路隧道浅埋偏压段，监测范围扩展至隧道中线两侧50m（3倍洞径），监测项目包括拱顶下沉、净空变化、地表沉降。施工中，地表沉降监测发现

距隧道中线20m处出现1.5cm/d的沉降速率（预警值1cm/d），及时判断为围岩变形加剧，立即停止开挖，采取加密锚杆措施，避免了塌方事故；某隧道施工中，监控量测数据显示：第3天拱顶下沉速率1.2cm/d，第4天升至2.0cm/d（超过预警值1.5cm/d），第5天达2.8cm/d。根据预警，施工单位立即采取暂停开挖、增设临时仰拱、加大注浆压力等措施，3天后沉降速率降至0.5cm/d，成功控制了变形发展。^[4]

（二）超前地质预报多方法组合

单一的超前地质预报方法难以全面识别浅埋偏压软弱围岩中的不良地质（如断层、涌水、溶洞等），采用“地质雷达+超前钻探+红外探水”组合法，可大幅提高预报准确率。例如：某隧道施工中，单独采用地质雷达预报时，对前方20m处的富水断层识别准确率仅60%；采用“地质雷达初测+超前水平钻探验证（每5m一个钻孔）+红外探水仪测水”组合法后，准确率提升至95%，提前15天探明断层位置及涌水量（300m³/h），为制定堵水方案争取了时间；某铁路隧道浅埋段，通过组合预报发现前方10m处存在一个直径5m的溶洞，溶洞内有积水。施工单位提前采取注浆填充溶洞、设置排水孔等措施，避免了开挖时的突水突泥事故，而该隧道未采用组合预报的某段，曾因未探明溶洞导致突水，涌水量达150m³/h，延误工期10天。

（三）地下水控制需堵排结合

浅埋偏压软弱围岩隧道的地下水处理应坚持“堵排结合、以堵为主”，超前注浆可有效减少涌水量，提高围岩强度，避免遇水软化。例如：某隧道穿越砂卵石层（渗透系数10⁻³cm/s），初期仅采用排水措施（设置集水井、排水泵），涌水量达200m³/h，导致围岩泥泞，无法开挖；改为超前深孔注浆（采用水泥-水玻璃双液浆，注浆压力2-3MPa）后，涌水量降至20m³/h以下，围岩强度提高，黏聚力从12kPa升至25kPa，顺利完成开挖；某高速公路隧道K8+300段，围岩为粉质黏土，富水性强，施工中采用“超前小导管注浆堵水+仰拱排水沟排水”的组合方案：小导

管注浆后，围岩渗透系数从10⁻²cm/s降至10⁻⁵cm/s，涌水量减少80%，掌子面干燥，开挖效率提高30%，且未出现因水导致的围岩软化问题。^[5]

（四）施工参数需动态调整

浅埋偏压软弱围岩地质条件复杂多变，固定施工参数难以适应动态变化，需根据监控量测数据和地质反馈，实时调整开挖进尺、支护强度、循环作业时间等参数，形成闭环管理。例如：某隧道施工中建立动态参数调整体系：当拱顶下沉速率<1cm/d时，采用0.8m循环进尺，支护滞后开挖1个作业循环；当1-2cm/d时，进尺缩减至0.5m，支护紧跟开挖面（滞后≤0.5个循环）；当>2cm/d时，立即停止开挖，采取加密拱架、超前注浆等强化措施。应用该体系后，该隧道偏压段施工中，参数调整响应时间从原来的12小时缩短至4小时，累计变形量较原计划减少40%；某高速公路隧道软弱围岩段初期采用固定0.6m进尺施工，出现变形速率超标（1.8cm/d），通过动态调整为0.4m进尺，并将工字钢拱架间距从60cm加密至50cm，3天后变形速率降至0.6cm/d，后续根据监测数据逐步恢复至0.5m进尺，既保证了安全，又避免了过度保守施工导致的工期延误。^[6]

四、结语

浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术核心在于“适应地质特性、强化支护措施、严控施工风险”。本文通过多个工程案例验证：埋深小于1.5倍洞径时围岩自稳能力骤降、偏压荷载导致结构受力不对称、软弱围岩遇水力学性能劣化等地质特性，决定了施工必须采用针对性技术；管棚与小导管组合超前支护、CRD工法、“早强快封”的初期支护等关键技术，能有效控制围岩变形；而加密监控量测、组合超前地质预报、“堵排结合”的地下水控制等风险控制措施，是保障施工安全的重要手段。

参考文献

- [1]何金刚.浅埋顺层偏压软弱围岩隧道施工变形控制技术[J].国防交通工程与技术,2014,12(3):49-52.
- [2]雷军.浅埋偏压、软弱围岩双线隧道大变形施工控制技术[J].国防交通工程与技术,2013,11(3):42-44.
- [3]田佳,刘军,王改鹏.三台阶七步法在大断面浅埋偏压软弱围岩隧道中的应用[J].隧道建设,2012(S1):85-89.
- [4]蔡来炳.软弱围岩浅埋偏压连拱隧道力学效应研究[D].同济大学土木工程学院,2008.
- [5]安丰军,安丰强.浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术研究[J].工程技术研究,2018,0(9):56-57.
- [6]张绍斐.高速公路双连拱隧道偏压浅埋段施工的工艺与技术[J].交通世界,2012(15):201-203.