

浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术探析

李 增

(云南交投公路建设第一工程有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要 浅埋偏压软弱围岩隧道具有埋深浅、围岩自稳能力差、应力分布不均等特点, 施工过程中极易发生变形、塌方及突水等灾害。本文系统阐述了适用于此类隧道的超前支护技术、分部开挖施工技术、初期支护优化技术以及监测与信息化施工技术, 以期为提高浅埋偏压软弱围岩隧道施工质量和安全水平提供借鉴。研究结果表明, 通过合理选择开挖方式、加强超前支护、优化初期支护参数和实施有效监测与反馈, 能够有效控制围岩变形, 保证隧道施工安全。

关键词 浅埋隧道; 偏压围岩; 软弱围岩

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.015

0 引言

伴随着我国交通基础设施建设呈现出快速发展的态势, 越来越多的隧道工程是在复杂地质条件之下开展建设的。浅埋偏压且围岩软弱的隧道在隧道工程中属于难点与重点的工程类型, 其特点表现为埋深相对较浅, 围岩呈现出明显的偏压状态, 并且围岩自身的强度处于较低的水平、稳定性也比较差。近些年来, 在我国西部山区、城市浅埋区等诸多地区所开展的隧道建设当中, 频繁地遭遇到此类复杂地质条件, 给工程建设带来了极为严峻的挑战。所以, 从系统的角度去探讨浅埋偏压软弱围岩隧道施工的关键技术, 是一项极为重要的课题。

1 浅埋偏压软弱围岩隧道的施工难点

1.1 围岩稳定性差导致支护难度大

在浅埋偏压软弱围岩隧道之中, 围岩往往呈现出低强度、高变形这样的特性, 其稳定性处于极差的状态。因隧道埋深较浅, 致使围岩自稳能力变得薄弱, 拱效应难以得到充分发挥。在开挖之后, 围岩极易出现松动变形的情况, 自稳时间颇为短暂, 有时仅仅有数小时甚至更短的时长。由于软弱围岩具备的时效性以及蠕变特性, 使得变形有着持续发展的趋向, 在初期阶段或许变形并不显著, 然而随着时间不断推移, 变形却会持续增多^[1]。

1.2 应力分布不均导致变形控制困难

在偏压条件之下, 隧道的一侧所受力气较大, 而另一侧所受力气则较小, 如此便形成了明显的压力不平衡状况。这种不均匀的应力分布所导致的结果是, 隧道在开挖之后会出现不对称的变形情况, 高压侧的变形量

通常是低压侧变形量的 2~3 倍。变形的方向同样也呈现出明显的偏斜状态, 并非简单的向内收敛情形。在应力集中区常常会发生局部的塑性破坏现象, 进而形成超挖或者欠挖的情况, 无疑增加了支护施工的难度。

1.3 掌子面失稳风险高影响施工安全

在浅埋偏压且围岩软弱的条件之下, 制约隧道安全施工的关键在于掌子面的稳定性。自身强度处于低下水平的软弱围岩, 其自稳能力颇为有限, 极易出现掌子面出现松动、崩落甚至坍塌的情况。而偏压这种状态更是对掌子面的不稳定性起到加剧的作用, 处于高压侧的剪切应力很容易致使局部出现失稳的状况。一旦掌子面失去稳定, 便有可能导致大面积的坍塌, 对施工安全构成严重的威胁。

2 浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术

2.1 超前支护技术

超前支护技术核心在于开挖之前对掌子面前方围岩展开预加固行动, 增强围岩自稳能力, 避免在开挖过程中出现变形塌方情况。就浅埋偏压软弱围岩所具有的特点而言, 在超前支护方面主要运用超前锚杆、超前小导管、管棚、围岩预注浆等技术或者它们的组合形式。在洞内常规施工过程中, 超前小导管支护属于极为常见的技术规划方式, 通过在开挖轮廓线以外按特定角度实施打设注浆小导管等措施, 营造出预支护拱壳形态, 不但能够实现对破碎围岩的加固处理, 而且可达成堵水之功效。施工阶段务必着重留意导管的外插角以及注浆参数的优化作业。针对洞口区域以及极为特殊的地质地段, 施工工作者可运用管棚支护技术手段, 通过拱部环向布局钢管塑造刚性支护环体,

搭配注浆操作构建复合支护体系。在偏压状况下，应当着重强化高压一侧管棚的布局密集程度，同时适度增添管棚的纵向搭接延展长度。

超前锚杆主要运用于掌子面的加固工作，多选用玻璃纤维锚杆呈放射状予以布置。而超前预注浆技术则借助改良围岩物理力学参数，既能够提升岩体的强度等级，又可以切实管控地下水的渗流情形。在实际施工过程中，施工人员要依据地质勘察数据资料以及监控量测得出的结果，动态化调整支护参数数值，必要之时采用“小导管+注浆”或者“锚杆—导管组合支护”等复合支护样式，搭建多层次的预加固架构体系。

2.2 分部开挖施工技术

在浅埋偏压软弱围岩隧道中，分部开挖施工技术是通过把隧道断面划分成若干个部分，然后依照特定的顺序分步展开开挖工作，其目的在于减小单次开挖的面积，降低围岩应力调整的幅度，进而对变形发展进行有效控制（见图 1）。

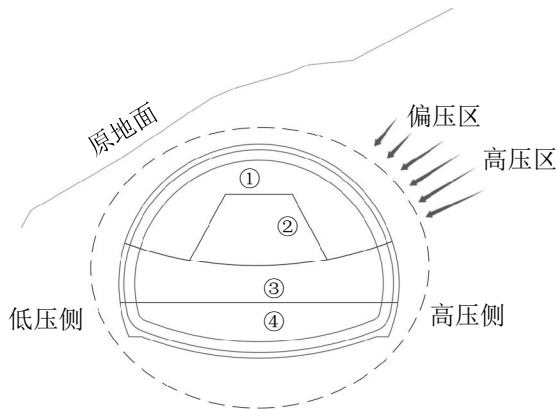


图 1 浅埋偏压软弱围岩隧道分部开挖示意图

依据浅埋偏压软弱围岩的特点来看，常用的分部开挖方法包含 CD 法、CRD 法、双侧壁导坑法等。其中，CD 法适用于中小断面且围岩条件相对较好的隧道；CRD 法是将上半断面分为中部核心区 and 两侧侧壁区来分步开挖，适用于大断面隧道；双侧壁导坑法与交叉中隔壁法在变形控制方面效果显著，适用于极其复杂的地质条件。在浅埋偏压软弱围岩的状况下，隧道施工需要依照围岩等级以及断面尺寸挑选适宜的分部开挖办法。按照《隧道工程技术规范》（GB 50121-2009）的规定要求，针对 I～III 级围岩的中小跨度隧道能够运用全断面方式；IV 级围岩中跨度隧道以及 III 级围岩大跨度隧道经过预加固之后同样可以采用。对于 IV～V 级围岩的中小跨度隧道，适宜采用中隔壁法（CD 法），通过设置竖向临时支撑将断面分步开展开挖，每一循环的进尺适宜把控在 1 榀钢架间距范围之内。在围岩条件更为

恶劣的 V 级围岩大跨度隧道或者地表沉降控制严格的区域，应当采用交叉中隔壁法（CRD 法）。针对浅埋大跨度隧道以及围岩条件极其恶劣的情形，可采用双侧壁导坑法。施工过程中要特别关注偏压状况下的非对称开挖事宜，优先进行低压一侧的开挖工作，高压一侧的进尺需要适度缩减，并及时对初期支护实施封闭处理从而形成闭合环状结构。与此同时，配合超前小导管等预加固措施，确保施工的安全程度以及围岩的稳定状态。台阶法在 V 级围岩小跨度隧道经过预加固之后可以采用，单车道隧道适宜采用二台阶法，断面规模较大的时候采用三台阶法，台阶长度控制在 1～1.5 倍洞跨范围^[2]。

2.3 初期支护优化技术

就浅埋偏压软弱围岩所具有的特点而言，传统均匀对称的初期支护方式难以满足施工要求，施工人员必须依据应力分布特点对支护参数加以优化。初期支护的优化主要围绕材料选择、结构设计以及施工工艺这三个方面来展开。

在材料选择方面，施工人员可采用高强喷射混凝土、高强度钢拱架以及高性能锚杆等材料，以提升支护结构的承载能力；在结构设计方面，按照偏压程度去设计非对称的支护参数，在高压侧采用更为强有力的支护措施；在施工工艺方面，施工人员应着重强调支护的及时性，把支护滞后距离尽量减小，进而确保支护能够达到应有的效果。浅埋偏压软弱围岩隧道的初期支护，通常所采用的是“喷射混凝土+钢拱架+锚杆+钢筋网”这样的复合支护结构。初期支护封闭时间是控制围岩变形的关键所在，要求及时施作仰拱，从而形成闭合的支护结构。

3 保障浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术的有效策略

3.1 合理选择开挖方式

确保施工安全的关键环节在于浅埋偏压软弱围岩隧道开挖方式的合理选择。对于此类隧道而言，较为常用的开挖方式为三台阶法，能对围岩变形实现有效控制且有利于保证施工进度。施工人员先对上部导坑开展开挖并进行支护，接着再开挖下部，以此减小扰动的范围。施工中，三台阶法把开挖面划分成上、中、下三个部分，单次进尺严格控制在 1～2 榀钢架间距范围内，使得围岩变形风险得到显著降低。同时，施工需遵循“短开挖、强支护、勤量测、快封闭”的原则，在软弱围岩段，可适当缩减每循环进尺。对于特别软弱的地段，则可采用台阶环形开挖法，把断面分成多个小断面依次展开施工^[3]。

开挖方式的选择应当依据围岩稳定时间（ T ）与支护时间（ t ）的关系来确定，满足公式： $T > t + \Delta t$ ，其中 Δt 为安全余度。在开挖之时，适宜采用机械配合人工作业的方式，以此减少爆破振动。

3.2 加强超前支护

超前支护是处理浅埋偏压软弱围岩隧道的重要技术手段。一般来说，超前小导管支护通常采用 $\phi 42$ mm 钢管，长 3 ~ 5 m，环向间距 30 ~ 40 cm，注浆压力 0.5 ~ 1.0 MPa，形成保护伞结构。特别软弱围岩可采用 $\phi 89 \sim 108$ mm 大管棚，注浆后形成预加固圈。

施工人员在施工过程中需要注意，偏压侧的超前支护可适当进行加密处理，钻孔角度要依据地质条件来加以调整，注浆应当分段开展，防止因压力过大而造成地层破坏的情况出现。同时，超前支护与后续的初期支护要实现有效连接，形成一个整体的支护系统。另外，超前支护的施工质量会直接对支护效果产生影响。施工人员在钻孔时，要准确把控角度和深度，注浆材料适宜选用水泥浆或者水玻璃溶液，以确保能够充分渗透并凝固^[4]。

3.3 优化初期支护参数

浅埋偏压软弱围岩隧道变形控制的核心环节在于初期支护参数的优化，在隧道施工中，初支方面宜选用 I20-I25 号工字钢拱架，具有较大的刚度和承载能力，把其间距减小至 0.6 ~ 0.8 m，增强支护的连续性和整体性，更好地约束围岩变形。并且，喷射厚度可为 25 ~ 30 cm 的 C25 混凝土。锚杆布置要考虑偏压特点，在偏压侧适当加密，一般采用 $\phi 22 \sim 25$ mm 螺纹钢（中空）锚杆。初支闭合时间需控制在 2 级台阶距离内，对于软弱围岩要及时施作仰拱以形成闭合环。同时，系统锚杆应做到注浆充分，以提高锚固力。初期支护材料应选用高早强混凝土为宜，达到缩短支护时间的目的。

施工人员还要注重拱架与喷射混凝土协同工作的情况，确保其整体性。支护结构的连接部位属于薄弱环节，应强化对其质量的控制，防止出现接茬不良、混凝土强度不足等问题。仰拱施工是控制围岩变形的关键举措，应尽量靠近开挖面，缩短与掌子面的安全距离，一般要在开挖面后 15 ~ 20 m 内完成。在施工期间，初期支护参数可依据监测数据进行动态调整，若变形过大，可增加拱架规格、减小间距或者增设加强拱，确保支护结构具备足够的承载能力与刚度来抵抗围岩压力，保障隧道施工及运营的安全^[5]。

3.4 实施有效监测与反馈

有效的监测与反馈机制是浅埋偏压软弱围岩隧道安全施工的重要保障，系统应监测拱顶下沉、周边收

敛、地表沉降等关键参数，监测点布置需考虑偏压特性，设置 5 ~ 7 点监测断面。监测频率按“开挖初期密、稳定后疏”原则，一般开挖后前 3 天每天 2 次，后续 7 天每天 1 次，稳定后每周 1 次。不同支护方式对围岩变形的控制效果如表 1 所示。

表 1 不同支护方式对围岩变形的控制效果

支护方式	拱顶下沉(mm)	最大水平收敛(mm)	变形控制效果
常规支护	85 ~ 120	95 ~ 140	较差
加强初支	40 ~ 65	45 ~ 80	良好
综合支护	15 ~ 30	20 ~ 45	优良

根据监测反馈的情况，检测人员要能及时对支护参数做出调整，若发现变形异常，可增设钢拱架、加密锚杆或者实施二次注浆。变形速率作为评判围岩稳定性的重要指标，一般控制在 0.2 mm/d 以内是安全的，处于 1 ~ 0.2 mm/d 时需加强支护，超过 1.0 mm/d 则应采取应急措施。除常规监测之外，还应在施工过程中强化人工巡视，及时察觉围岩异常情况，如裂缝、渗水、掉块等前兆，做到早发现、早处理，避免问题扩大，有效防范地质灾害，确保工程的安全与质量^[6]。

4 结束语

隧道施工安全与质量的保障需要从多个维度开展综合技术应用。合理选择开挖方式、加强超前支护、优化初期支护参数、实施有效监测与反馈，为施工决策提供科学依据，构成了一个完整的技术体系。在实际工程应用中，施工团队应根据具体地质条件和工程环境，灵活调整各项技术参数，确保施工安全高效。

参考文献:

- [1] 刘佳诚. 软弱围岩浅埋大断面隧道施工工法与变形控制技术分析[J]. 河南科技, 2024, 51(19): 48-53.
- [2] 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.
- [3] 杨永斌, 王庆, 王星, 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(04): 137-142.
- [4] 连其龙, 段振益. 富水软弱围岩浅埋大跨度隧道施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(10): 185-187.
- [5] 孙子文. 软弱围岩浅埋偏压四车道公路隧道安全施工技术[J]. 时代汽车, 2024(24): 164-166.
- [6] 张妞, 刘昶, 刘辉. 软弱围岩浅埋偏压连拱隧道施工方案优化研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(04): 88-97, 104.