

软弱围岩条件下暗挖隧道支护结构优化设计实践

吴拓良

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：为了全面提升软弱围岩条件下暗挖隧道施工质量，保障隧道结构的稳固性，本文着重探讨这一特殊环境下暗挖隧道支护结构优化设计具体措施。文章针对软弱围岩力学特性优化支护结构设计思路，细化预支护、初期支护及整体结构体系各项参数，破除传统支护方案的适配性短板。实践结果表明，经优化后的支护结构可有效控制围岩拱顶下沉与周边收敛变形，减小支护结构内力应力，降低施工坍塌风险，同时缩减工程耗材、提升施工效率，实现安全与效益双重提升。研究结论可为同类软弱围岩地质条件下暗挖隧道支护设计、施工管控提供可靠的参考依据，助力地下工程支护设计精细化落地。

【关键词】：软弱围岩；暗挖隧道；支护结构；优化设计

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.086

引言

现阶段我国城市地下空间开发力度持续加大，暗挖隧道施工作业不仅灵活性强，而且不会对地面环境造成太大的干扰，所以被广泛应用于现代隧道工程建设中，但施工中时常遭遇软弱围岩地层，成为工程管控的重点与难点。软弱围岩自身承载能力弱、结构松散、流变特性明显，受施工扰动后极易发生大变形、坍塌等病害，传统支护方案往往难以适配其变形规律，轻则引发支护开裂、侵限，重则诱发安全事故，延误工期、增加工程成本。目前业内针对软弱围岩支护虽有诸多研究，但多偏向理论分析，现场实操性与地质适配性仍有提升空间。基于此，本文结合工程实践深入剖析软弱围岩特性与传统支护缺陷，开展针对性支护结构优化设计，通过现场应用验证优化方案的可行性，旨在完善软弱围岩隧道支护体系，推动地下隧道工程安全高效施工。

1 软弱围岩暗挖隧道工程特性

软弱围岩涵盖粉质黏土、泥岩、风化岩及破碎岩体等多种地质类型，其地层松散，力学性能较差，给暗挖隧道施工带来了更为严峻的挑战。此类围岩自身强度低、胶结性差，节理裂隙发育密集，遇水易软化、崩解，整体稳定性极差，在隧道开挖卸荷后，围岩应力快速重新分布，极易产生塑性流变与大范围松动圈，变形持续时间长、收敛速度慢^[1]。相较于硬质围岩，软弱围岩对施工扰动敏感度极高，开挖进尺、支护时机稍有偏差就会加剧围岩失稳风险，且围岩压力分布不均，易对支护结构产生偏压作用。与此同时，软弱围岩地层往往伴随地下水渗透影响，进一步弱化岩体结构，加大施工难度，整体呈现出“难成拱、易变形、高风险、难管控”的工程特性。

2 暗挖隧道传统支护结构形式及局限性

我国当前绝大多数暗挖隧道施工中采用“初期支护+二次衬砌”的复合式常规支护模式，即初期支护以喷射混凝土、锚

杆、钢拱架、钢筋网联合支护为主，二次衬砌采用钢筋混凝土浇筑，依托新奥法原理实现围岩与支护协同受力^[2]。这种支护形式在地质条件较好的地层中适用性较强，但若将其应用于软弱围岩地层，便存在明显的局限性：一是预支护措施缺失或单一，难以提前加固围岩，无法遏制初期围岩变形；二是支护参数多采用经验设计，未结合软弱围岩流变特性针对性调整，钢拱架间距、锚杆长度难以适配围岩受力需求；三是支护结构封闭成环时机滞后，整体协同承载能力差；四是支护结构柔性不足，无法适配围岩大变形特征，易出现应力集中导致支护开裂、失效，难以从根本上解决软弱围岩施工稳定性难题。

3 软弱围岩条件下暗挖隧道支护结构优化设计

3.1 优化设计影响因素

软弱围岩暗挖隧道支护结构的可靠性受多方面因素的干扰，整体结构设计优化属于多因素耦合的系统工程，优化前需全面梳理各类核心影响因素，保障方案贴合工程实际。首要因素为围岩地质条件，包括围岩等级、岩体完整性、含水率、风化程度及流变特性，直接决定支护强度与预加固措施选型；其次是隧道自身参数，涵盖断面尺寸、埋深、线形设计，深埋隧道围岩压力更大，大断面隧道需强化支护整体性；再者是施工工法与环境约束，浅埋近接隧道需兼顾地面沉降管控，施工开挖进尺、爆破扰动也会影响支护参数设定；同时还要考量支护结构受力机理、材料性能及工程经济性，兼顾结构长期稳定性与施工可行性，避免过度支护造成成本浪费，也杜绝支护不足引发安全风险，各类因素相互制约，需统筹协调、综合把控^[3]。

3.2 支护结构优化方法

本研究采用多种方法结合的支护结构优化设计模式，旨在全方位提升方案科学性与实操性。首先采用理论计算法，依据围岩压力理论、结构力学原理，核算围岩荷载、支护结构内力与变向量，确定基础支护参数，明确支护结构受力阈值，为优

化设计提供理论支撑；其次运用数值模拟法，借助有限元分析软件构建围岩-支护结构三维模型，模拟不同支护方案下围岩变形、应力分布及塑性区发展规律，对比优选最优参数组合，预判施工风险点；再者依托工程类比法，调研大量同类软弱围岩隧道工程案例，总结成熟支护经验，结合本工程地质特点进行本土化改进；最后采用动态优化法，结合现场地质超前预报与施工监测数据，实时调整支护参数，实现设计与施工的动态适配，全方位保障优化方案落地生效。

3.3 支护结构整体优化方案

3.3.1 预支护系统的优化

软弱围岩暗挖隧道施工中，预支护是保障施工作业有序推进的第一道防线，该支护操作的主要目的是通过提前固结松散围岩、构建超前防护结构，从源头遏制开挖诱发的围岩初始变形，针对软弱围岩自稳能力极差、遇水易失稳的特性，预支护系统应摒弃传统单一、低效的超前锚杆工艺，结合围岩破碎程度与水文条件实施分级优化设计，全面提升超前加固效果。

普通软弱破碎围岩区段采用超前小导管注浆预支护体系，合理选定小导管规格、布设间距与外插角，沿隧道拱部轮廓线均匀布设，搭配水泥-水玻璃双液浆，严控注浆压力与注浆量，保证浆液充分渗透填充围岩裂隙，形成封闭且高强度的环形加固圈，阻断围岩渗水通道、提升围岩整体刚度；富水、极破碎的软弱围岩区段升级采用超前长管棚与超前小导管联合预支护方案，利用长管棚承担上部围岩荷载，发挥刚性支撑作用，配合小导管注浆细化加固围岩缝隙，实现“刚性支撑+柔性固结”的双重防护效果^[4]。

与此同时，还需优化预支护施工工序，保证超前加固施工质量达标后再开展隧道开挖作业，最大限度减小开挖扰动对围岩的影响，为后续开挖与初期支护施工营造稳定的作业环境，从前期杜绝围岩坍塌、大变形等施工风险，全程贴合软弱围岩变形管控核心需求，筑牢隧道施工安全第一道屏障。

3.3.2 初期支护参数的优化

初期支护作为软弱围岩隧道的核心承载结构，其支护效果对隧道整体施工质量具有极大的影响，参数设计是否合理直接决定了围岩变形管控效果与结构整体稳定性。实践中需结合软弱围岩流变特性、受力分布规律针对性优化各项支护参数，协同适配支护结构与围岩受力。优化设计以“强支护、快封闭、控变形”为核心。

首先，优化钢拱架参数，适当缩小钢拱架布设间距，选用力学性能更优的型钢拱架，同时增设纵向连接筋与斜向加固筋，强化拱架之间的整体性，避免单个拱架受力失衡，提升初期支护整体刚度；其次，优化锚杆体系，摒弃普通水泥砂浆锚

杆，改用中空注浆锚杆，加长锚杆有效长度、缩小布设间距，保证锚杆深入围岩深层稳定区域，通过高压注浆让锚杆与围岩紧密粘结，充分发挥锚杆主动锚固、加固围岩的作用，调动围岩自身承载能力^[5]；再者，优化喷射混凝土施工，选用早强、高韧性混凝土，合理提升混凝土喷射厚度，增设双层钢筋网，分散围岩局部集中应力，防止混凝土开裂剥落；最后，优化支护施工节奏，隧道开挖后立即初喷混凝土封闭围岩，快速跟进架设钢拱架、施作锚杆与复喷混凝土，最大限度缩短围岩裸露时间，及时约束围岩变形，让初期支护快速发挥承载作用，适配软弱围岩变形快、流变明显的特性，实现围岩变形的全程可控。

3.3.3 支护结构体系的优化

软弱围岩条件下暗挖隧道支护结构体系的优化可从围岩、初期支护与二次衬砌三个方面着手，全面提升结构整体稳定性与长期耐久性，贴合软弱围岩隧道全生命周期受力需求。

一方面，严格把控初期支护封闭成环时机，缩短仰拱施作与掌子面的距离，加快初期支护闭合成环速度，形成环形受力结构，彻底改变支护受力形态，提升结构抗变形、抗偏压能力；另一方面，优化双层支护衔接设计，在初期支护与二次衬砌之间合理铺设防水层与缓冲层，既保证防水效果，又能协调两层支护的变形节奏，避免层间脱空、受力脱节，实现荷载的均匀传递与协同承载；同时动态调整二次衬砌施作时机，依托现场围岩监测数据，待围岩变形速率趋于稳定、变形量达到规范要求后，再施作二次衬砌，充分发挥初期支护前期承载作用，减少二次衬砌结构受力，避免二次衬砌过早受力引发开裂^[6]；此外，优化支护断面受力设计，重点强化拱部、边墙等受力薄弱区域的支护性能，完善支护结构细部节点处理，消除应力集中隐患。最终形成“超前预支护控初始变形、初期支护担主体荷载、二次衬砌保长期稳定”的全流程支护体系，兼顾结构刚度、柔性与整体性。

4 工程实践案例分析

4.1 工程概况

某交通暗挖隧道全长 860m，断面为马蹄形，开挖宽度 10.2m，高度 8.5m，平均埋深 16.8m。隧址区以粉质黏土、强风化泥岩为主，围岩等级为 V 级，属于典型软弱围岩地层，岩体松散、含水率较高，无良好隔水层，施工期间易出现围岩大变形、坍塌等问题。

4.2 原支护设计方案与施工弊端

该隧道原先采用常规复合式支护模式，预支护仅采用简单超前锚杆，初期支护钢拱架间距 1.2m，锚杆长度 3.5m，喷射混凝土厚度 22cm。围岩开挖后拱顶下沉速度快，周边收敛量

超标,局部出现掉块、坍塌隐患;钢拱架受力过大出现轻微变形,喷射混凝土多处开裂,支护结构整体稳定性差;施工过程需反复加固,施工进度滞后,安全管控压力极大,难以满足现场施工安全与质量要求,亟需对原有支护结构进行全面优化。经现场勘测与理论分析,原方案未贴合软弱围岩流变特性,支护强度不足、预加固不到位、结构整体性差,无法适配现场地质条件,优化整改势在必行。

4.3 基于软弱围岩特性的支护结构优化设计

基于本工程V级软弱围岩特性,综合考虑多方面因素,最终选择以“强预支护、紧封闭、勤量测”为原则开展优化设计。预支护采用超前小导管注浆加固,小导管选用 $\phi 42$ 钢管,长度4.5m,环向间距35cm,注浆压力控制在0.5-0.8MPa,全面固结拱部围岩;初期支护将钢拱架间距调整为0.8m,锚杆升级为中空注浆锚杆,长度4.5m,间距 $0.8\text{m}\times 1.0\text{m}$,喷射混凝土厚度提升至25cm,增设双层钢筋网,及时施作仰拱实现初期支护快速封闭;二次衬砌采用C30钢筋混凝土,厚度40cm,待围岩变形稳定后施作。同时优化施工工序,严控开挖进尺不大于0.5m,做到开挖一段、支护一段,实现动态设计、动态施工,全方位提升支护结构稳定性。

4.4 现场监测与效果评估

整个施工期间对支护应力与围岩变形情况进行了严密的监测,布设拱顶下沉、周边收敛监测点位,定期采集数据并分析。监测结果显示,优化后围岩变形速率快速放缓,最终沉降

量、收敛量均控制在规范阈值内,支护结构应力稳定,无开裂、变形现象,施工安全全程可控,优化方案成效显著。监测数据如下表1。

表1 实际监测效果分析表

监测项目	拱顶下沉	周边收敛	钢拱架应力
原方案最大监测值	68mm	75mm	210MPa
优化后最大监测值	22mm	25mm	126MPa
规范允许阈值	$\leq 40\text{mm}$	$\leq 45\text{mm}$	$\leq 180\text{MPa}$
管控效果	达标	达标	达标

5 结语

总而言之,优化软弱围岩暗挖隧道支护结构的时候,一定要紧扣地质特性,摒弃传统固化设计思路,实现针对性、精细化优化。本文通过工程实践验证,超前预加固、支护参数与体系协同优化,可有效管控围岩变形、提升施工安全性。后续同类工程需强化地质预判与动态监测,兼顾安全与经济性,持续完善支护优化体系,推动软弱围岩隧道工程施工提质增效,为地下工程建设提供更多实践经验。

参考文献:

- [1] 徐遥.软弱围岩浅埋大跨度隧道掘进施工技术[J].工程技术研究,2025,10(21):73-75.
- [2] 毛立夏.软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管控[J].科技创新与生产力,2025,46(10):81-84.
- [3] 夏俊伟.软弱围岩隧道加固与稳定性控制[J].交通世界,2025,(24):166-169.
- [4] 高燕红.浅埋隧道软弱围岩隧道设计施工优化技术研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(03):107-109.
- [5] 金波.大跨高地应力软岩隧道初期支护施工技术[J].建筑技术开发,2025,52(04):46-48.
- [6] 何正轩.软弱围岩隧道开挖及支护施工技术探究[J].科技创新与应用,2020,(14):143-144.