

隧道围岩稳定性评价及支护设计优化

杜晓丹

河南交通投资集团有限公司洛阳分公司 河南 洛阳 471000

摘要：隧道围岩稳定性评价是隧道工程的关键。评价基础包括围岩物理力学特性分析和影响围岩稳定性的关键因素。评价方法有定性、定量及综合评价三种，各有优势且互补。基于评价结果，支护设计优化可从薄弱区域强化、过度支护调整、结构形式优化三方面入手，关键技术包括参数敏感性分析、动态优化设计流程构建、多目标优化模型应用。优化方案需通过力学性能验证和稳定性提升效果评估，确保其能为隧道工程提供长期可靠的稳定保障。

关键词：隧道围岩；稳定性评价；支护设计

引言：隧道工程中，围岩稳定性评价与支护设计优化是保障施工安全与工程质量的关键。围岩稳定性受物理力学特性、地质条件、施工扰动及环境因素等影响，需综合运用定性、定量及综合评价方法全面研判。基于评价结果，支护设计优化可聚焦薄弱区域强化、过度支护调整及结构形式适应性优化。借助参数敏感性分析、动态优化设计流程构建及多目标优化模型应用等关键技术，确保优化科学高效。最后，通过力学性能验证与稳定性提升效果评估，保障优化方案可行性。

1 隧道围岩稳定性评价基础

1.1 围岩物理力学特性分析

围岩强度参数测定需通过标准化试验手段获取核心力学指标，表征围岩抵抗变形与破坏的能力，需结合岩体完整程度与应力环境进行综合修正，确保参数能真实反映围岩在工程受力状态下的力学响应，为稳定性计算提供可靠基础数据。围岩结构面特征识别需聚焦界面形态、发育密度、连通性及充填情况等关键属性，按结构面对围岩完整性的破坏程度进行系统分类，明确结构面组合形式对岩体承载能力的削弱作用，为判断围岩失稳风险源提供依据。围岩应力状态分布规律研究需分析原始应力场与工程扰动应力场的叠加效应，探究应力大小、方向及分布形态随空间位置的变化特征，明确应力集中区域的形成机制，为预判围岩变形破坏的发生部位与形式提供理论支撑。

1.2 影响围岩稳定性的关键因素

地质条件相关影响因素主要包括岩体成因类型、岩性组合、地质构造发育程度、岩体完整性及地下水赋存状态等，这些因素共同决定围岩的天然稳定性，是评价工作中需优先考量的基础条件。施工扰动通过改变围岩原始应力平衡状态，引发应力重分布与岩体损伤累积，其影响程度与施工方法、推进速度、支护时机密切相关，

会直接加剧围岩变形或诱发失稳，是动态评价中需重点关注的变量。环境因素主要通过温度变化、湿度波动等方式作用于围岩，导致岩体物理力学性质劣化、结构面强度降低，进而影响围岩整体稳定性，该类影响具有长期性与累积性，需纳入长期稳定性评价体系^[1]。

2 隧道围岩稳定性评价方法

2.1 定性评价方法体系

围岩分类标准应用是定性评价的核心手段，通过整合岩体外观特征、结构完整性、力学性能关联指标等基础信息，按照统一的分类原则与判定流程对围岩进行等级划分。该方法注重对围岩天然属性与工程适应性的宏观判断，操作简便且适用性广泛，能快速为工程初期方案设计、支护类型选型提供基础依据，同时为后续精细化评价奠定分类基础，其核心价值在于通过标准化的定性描述，建立围岩稳定性的初步认知框架。结构面发育程度定性分析聚焦于岩体内部各类界面的分布特征与组合关系，通过观察结构面的延展范围、密集程度、界面平整性及充填物性质等关键信息，判断其对岩体整体性的破坏程度。该分析方法需结合地质勘察过程中的直观观测与经验判断，明确结构面可能引发的岩体滑移、崩落等失稳模式，为识别围岩稳定性薄弱环节、制定针对性防护措施提供定性支撑，是前期风险预判的重要手段之一。围岩变形趋势定性判断基于施工过程中的现场监测数据与地质现象观察，通过分析围岩表面位移、裂缝发育、支护结构受力等直观表现，结合岩体力学特性与应力环境变化，预判围岩变形的发展方向与潜在风险。该方法注重动态跟踪与经验积累，能及时捕捉围岩稳定性的动态变化特征，为调整施工节奏、优化支护时机提供实时参考，有效规避突发性失稳风险，是施工阶段动态管控的重要定性工具。

2.2 定量评价方法研究

数值模拟评价技术借助专业分析工具,将围岩地质条件、力学参数、边界条件等转化为可计算的模型参数,通过构建符合实际工程场景的数值模型,模拟围岩在不同施工阶段、不同应力状态下的变形与破坏过程。该技术能精准呈现围岩内部应力分布、位移演化规律及潜在失稳区域的量化特征,突破了传统定性评价的局限性,可对不同工程方案的稳定性效果进行对比分析,为方案优化提供量化依据,显著提升评价结果的科学性与精准度。力学计算模型构建与应用以岩体力学理论为基础,根据围岩的受力特性与变形机制,选择适宜的力学模型(如弹性模型、弹塑性模型等),明确计算参数的取值标准与边界条件的设定原则^[2]。通过建立系统化的力学计算体系,对围岩的承载能力、变形量、应力集中程度等关键指标进行定量计算,该方法注重理论与实际的结合,能通过精准的量化结果验证定性评价结论,为工程设计中的支护参数确定、结构安全验算提供可靠的力学依据。稳定性评价指标量化分析需建立科学的指标体系,涵盖围岩强度储备系数、变形速率、应力集中系数、结构面抗剪强度等关键量化指标,通过标准化的测试手段与计算方法,获取各指标的具体数值。通过对指标数值的统计分析 with 阈值判定,明确围岩稳定性的量化等级,该方法能将抽象的稳定性概念转化为直观的量化结果,实现对围岩稳定状态的精准界定,为不同工程阶段的稳定性评价提供统一的量化标准,提升评价工作的客观性与可比性。

2.3 综合评价方法整合

定性与定量方法的互补应用是综合评价的核心原则,通过整合定性评价的宏观判断与定量评价的精准量化优势,实现对围岩稳定性的全面研判。定性方法为定量评价提供基础框架与参数选取依据,避免定量模型因参数设定不合理导致结果失真;定量方法则通过量化数据验证与补充定性评价结论,提升评价结果的可信度与精准度。两者的有机结合能兼顾评价的全面性与针对性,有效覆盖不同工程阶段的评价需求,解决单一评价方法的局限性,为工程决策提供更全面的科学支撑。多维度评价指标权重确定需基于围岩稳定性的影响因素分析,构建涵盖地质条件、施工扰动、环境因素、力学特性等多维度的评价指标体系,通过层次分析、熵权法等科学方法,结合工程实际需求与专家经验,确定各指标在综合评价中的重要程度。权重的合理设定能突出关键影响因素的作用,避免次要指标对评价结果的干扰,确保综合评价结果能准确反映围岩稳定性的核心影响因素,提升评价体系的科学性与合理性,为后续的等级划

分提供公平、客观的量化基础^[3]。稳定性等级划分标准是综合评价的最终呈现形式,需结合定性评价结论与定量指标数值,制定多等级的划分阈值与判定规则,通常分为稳定、较稳定、基本稳定、不稳定、极不稳定等等级。该标准需明确各等级对应的定性特征与定量指标范围,确保评价结果的统一性与可比性,同时需兼顾工程实用性与科学性,使等级划分能直接指导工程实践中的方案设计、风险管控与支护措施选择。通过标准化的等级划分,为工程各参与方提供清晰的稳定性判断依据,有效提升工程决策的效率与准确性。

3 支护设计优化策略

3.1 基于稳定性评价结果的优化方向

针对围岩薄弱区域的支护强化是优化设计的核心重点,需依据稳定性评价精准定位围岩失稳风险较高的区域,通过加密支护结构布设间距、增大支护构件截面尺寸、选用高强度支护材料等方式,系统性提升局部区域的支护强度与约束效能。强化措施需贴合薄弱区域的地质构造特征、应力集中状态与岩体变形规律,重点解决岩体完整性不足、抗变形能力薄弱等核心问题,通过精准化、差异化设计遏制局部失稳隐患蔓延,确保支护体系全面抵御围岩变形与破坏作用,为隧道结构安全构筑稳固防护屏障。过度支护环节的参数调整聚焦支护设计的经济性与合理性,基于稳定性评价结果识别支护强度、布设密度等超出实际需求的参数,通过下调冗余参数、简化非必要结构形式、优化构件组合方式等路径优化设计。调整过程以保障围岩稳定性为前提,综合考量围岩天然承载能力、应力分布特征与变形趋势,采用梯度化方式把控参数变动幅度,避免资源浪费、工序冗余与效率下降,实现支护设计在安全性、经济性与实用性上的高度统一,确保支护效果满足工程安全标准。支护结构形式的适应性优化需结合稳定性评价反映的围岩力学性能、结构面发育特征与变形趋势,选择匹配度更高的支护类型。优化过程需考量围岩抗压抗剪强度、岩体完整性、结构面连通性及变形速率等关键因素,调整支护结构的受力传递模式、空间布设形态与构件衔接方式,确保与围岩形成协同承载体系,充分发挥围岩自身承载潜能与支护约束作用。同时兼顾施工便利性、实施可行性与长期稳定性,使支护结构在不同地质条件与施工阶段均能高效发挥防护效能,提升支护体系的整体适配性。

3.2 优化设计的关键技术

支护参数敏感性分析是优化设计的核心技术支撑,通过系统探究支护强度、布设间距、构件刚度、支护时

机等参数对支护效果与围岩稳定性的影响程度,明确各参数的敏感区间、影响权重与变化规律。分析过程以围岩力学特性、应力环境分布与工程需求为基础,采用系统化思路量化判断单一或多参数组合变化对支护体系承载能力、变形控制效果的关联程度。通过敏感性分析锁定对优化目标起决定性作用的核心参数,为参数精细化调整、方案对比优化提供科学依据,提升优化设计的针对性与高效性,避免盲目调整造成的资源浪费。动态优化设计流程构建强调支护设计的时效性、适应性与闭环性,基于施工过程中围岩稳定性的实时监测数据、阶段性评价结果与现场地质反馈,建立全流程动态闭环体系。流程需明确各阶段核心工作内容、数据传递路径、决策标准与时间节点,确保及时捕捉围岩稳定性动态变化、地质条件波动与支护体系实际响应,快速调整支护设计参数、优化结构形式与施工工艺。该设计打破传统静态设计的局限性,通过实时反馈与持续迭代,使支护设计始终贴合围岩实际状态与施工进展,有效应对各类突发风险^[4]。多目标优化模型应用旨在统筹平衡支护设计的多重核心目标,构建涵盖安全效果、成本控制、效率提升、资源节约等多维度的优化模型,实现各目标的协同优化与动态平衡。模型需考虑各目标间的约束关系与优先级排序,将围岩稳定性提升作为核心目标,兼顾经济性、可操作性与环保性,通过科学的权重分配明确各指标重要程度。应用过程结合工程需求与约束条件,通过系统化求解筛选最优设计方案,确保优化结果满足隧道长期安全运营要求,同时实现施工成本合理控制与效率提升,为支护设计提供全面科学的决策支持。

3.3 优化方案的可行性验证

力学性能验证方法是保障优化方案可靠性的关键环节,通过模拟支护结构与围岩协同工作的力学环境,系统测试支护体系的承载能力、变形抗力、应力传递效率、抗疲劳性能等核心指标。验证过程以岩体力学、结构力学原理与工程实际受力情况为依据,采用专业测试手段与分析技术,检验支护结构的强度、刚度、韧性及

与围岩的协同工作能力,分析不同受力状态下的力学响应与变形规律。通过验证明确优化方案是否具备足够承载能力,能否抵御围岩作用力与外部荷载,是否满足工程安全运营要求,为方案最终确定提供坚实依据。稳定性提升效果评估需对比优化前后围岩稳定性的核心指标变化,量化评估优化方案的实际应用效果,重点分析围岩变形量、应力分布均匀性、失稳风险等级、支护结构受力状态等指标的改善程度。评估过程结合长期监测数据、阶段性力学分析结果与现场观测记录,综合判断方案对围岩稳定性的提升幅度,验证是否解决原设计中稳定性不足、应力集中、变形过大等核心问题。评估注重全面性、客观性与长效性,既关注短期施工阶段的稳定性提升,也考量长期运营中的稳定性保持能力与环境因素影响下的性能衰减,确保优化方案提供长期可靠的安全保障。

结束语:隧道围岩稳定性评价与支护设计优化是保障隧道工程安全与高效推进的关键。通过全面分析围岩物理力学特性、明确影响稳定性的关键因素,并综合运用定性定量评价方法,能精准把握围岩稳定状态。基于此开展的支护设计优化,从薄弱区域强化、参数调整到结构形式优化,借助关键技术实现科学设计。最后,通过力学性能验证与稳定性提升效果评估,确保优化方案可行,为隧道工程在复杂地质条件下安全施工与长期稳定运营提供有力保障。

参考文献

- [1]张顶立,王梦恕.公路隧道施工围岩变形监控与预测[J].中国安全科学学报,2003,13(4):39-43.
- [2]龚伦,杨春和,刘建军.公路隧道软弱围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3326-3331.
- [3]张成平,张顶立,王梦恕.公路隧道施工期围岩稳定性判别方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):450-455.
- [4]刘招伟,王梦恕,郭小红.公路连拱隧道围岩稳定性与支护技术研究[J].中国公路学报,2003,16(1):43-48.