

软岩地层中隧洞围岩稳定性影响因素及成洞条件分析

周 通 黄洪照 李 伟

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 软岩地层因其强度低、变形大、流变性强、遇水软化等特性,给隧道工程建设带来极大挑战。本文系统梳理了软岩的定义与分类,深入分析了影响软岩隧洞围岩稳定性的主要因素,包括岩体物理力学性质、地质构造、地下水作用、地应力状态及施工扰动等。在此基础上,探讨了软岩地层中的成洞条件,并提出了针对性的围岩稳定性控制对策。研究表明,软岩隧洞的稳定性是多因素耦合作用的结果,需采取“地质先行、动态设计、及时支护、强化排水、信息化施工”的综合策略,方能有效保障工程安全与施工效率。

关键词: 软岩;隧洞;围岩稳定性;影响因素;成洞条件;支护对策

引言

随着我国基础设施建设向西部山区、高原及复杂地质区域不断延伸,隧道工程越来越多地穿越软弱岩层。软岩地层具有显著的工程地质特殊性,其强度低、变形模量小、流变效应显著,且对水和应力扰动极为敏感,极易在开挖后发生大变形、塌方甚至失稳破坏,严重威胁施工安全与结构耐久性。例如,兰渝铁路西秦岭隧道、乌鞘岭隧道以及川藏铁路部分区段均遭遇了严重的软岩大变形问题,导致工期延误、成本激增。因此,深入研究软岩地层中隧洞围岩稳定性的关键影响因素,科学评估其成洞条件,对于优化支护设计、指导施工组织、预防地质灾害具有重要的理论价值与工程意义。本文旨在系统梳理软岩特性,剖析围岩失稳机理,明确成洞判据,并提出切实可行的控制措施,为类似工程提供技术参考。

1 软岩的定义与分类

1.1 软岩的定义

“软岩”并非严格的岩石学概念,而是工程地质与岩土工程领域基于工程行为提出的术语。目前尚无统一标准,但普遍认为软岩是指在工程力作用下(如开挖卸荷、支护反力等)表现出显著塑性变形、流变或膨胀特性的低强度岩体。国际岩石力学学会(ISRM)建议将单轴抗压强度(UCS)小于25 MPa的岩石视为软岩;而我国《工程岩体分级标准》(GB/T 50218-2014)则将强度较低、完整性差、易风化或遇水软化的岩体归为软岩范畴。

1.2 软岩的分类

软岩依成因与工程特性可分为:①泥质软岩,如泥岩等,富含黏土矿物,亲水性强,遇水易软化崩解、强度骤降;②煤系软岩,含煤层及夹矸,强度极低,结构

松散,易片帮冒顶;③盐岩与膏岩,如岩盐等,具显著蠕变和溶解性,高应力或地下水作用下易流动变形;④风化软岩,硬岩风化而成,结构疏松,力学性能退化;⑤构造破碎带软岩,受构造作用破碎,整体性差。

2 软岩隧洞围岩稳定性影响因素分析

2.1 岩体物理力学性质

软岩的物理力学性质是决定其工程行为的基础。这类岩体通常表现为单轴抗压强度低于30MPa,弹性模量小于10 GPa,泊松比大于0.35,且在峰值强度后迅速进入应变软化阶段。这种低强度、高变形性的组合使得软岩在开挖卸荷后难以维持自身结构完整性,围岩压力迅速显现并持续发展。更为关键的是,软岩普遍具有显著的流变特性,即使在恒定应力作用下也会随时间产生不可逆的蠕变变形,导致初期支护结构长期受压甚至屈服^[1]。此外,由于其内部黏土矿物含量高,微观结构易受环境变化影响,宏观上表现为对湿度、温度和应力路径的高度敏感性。因此,在软岩隧道设计中,若仅采用静态力学参数进行计算,往往低估实际变形量,造成支护体系失效。

2.2 地质构造与结构面发育

地质构造对软岩隧洞稳定性的影响主要通过结构面的分布与组合体现。断层、节理、层理及片理等不连续面不仅切割岩体、降低其整体性,还常常构成潜在的滑移面或崩塌边界。在软岩地层中,这些结构面往往充填有泥质或碎屑物质,抗剪强度极低,在开挖扰动下极易发生错动或张开。特别是在褶皱核部或断层交汇地带,岩体受多期构造作用叠加,结构紊乱,RQD值普遍偏低,围岩呈碎裂—散体状,自稳能力几近丧失。此外,顺层隧道若穿越倾角较缓的软弱夹层,极易引发沿层面大规模滑移变形,表现为一侧拱腰持续收敛、仰拱隆起等非对称破坏模式。因此,对区域构造背景和局部结

构面网络的精细调查,是评估软岩隧道风险的前提。

2.3 地下水作用

当水渗入软岩孔隙或沿结构面流动时,首先通过物理吸附和离子交换作用削弱黏土颗粒间的联结力,导致岩体强度显著降低,这一过程称为软化作用。实验表明,某些泥岩浸水后单轴抗压强度可衰减50%以上。同时,水膜在结构面上起到润滑作用,大幅降低摩擦系数,促进块体滑移。对于石膏、岩盐等可溶性软岩,地下水还会引发溶蚀,形成空洞或扩大原有裂隙,进一步削弱围岩承载能力。此外,静水压力会抵消有效应力,依据有效应力原理,这直接降低了岩体的抗剪强度。在高寒地区,冻融循环更会加剧岩体开裂剥落。因此,控制地下水不仅是防渗需求,更是维持围岩力学性能的关键措施。

2.4 地应力状态

尽管软岩本身强度低,但在浅埋条件下仍可能保持稳定;然而一旦埋深增加,原岩应力随之升高,当最大主应力接近或超过岩体屈服强度时,围岩便进入塑性流动状态。软岩对此尤为敏感,常在中等地应力水平(如水平应力10~20 MPa)下即发生显著挤压变形。高地应力环境下,软岩隧洞常表现出径向大收敛、底鼓严重、支护结构扭曲等特征,且变形具有时间依赖性,可持续数月甚至数年^[2]。构造应力($K = \sigma_h/\sigma_v$)场的存在更使问题复杂化,若最大水平主应力方向与隧道轴线斜交,将导致非对称变形,增加支护设计难度。因此,准确测定地应力大小与方向,并将其纳入稳定性分析框架,是软岩隧道成败的关键。

2.5 施工方法与支护时机

施工过程本身是对围岩的一次强烈扰动,其方式与节奏直接决定围岩响应路径。在软岩中,若采用大断面一次性开挖或进尺过长,将导致围岩暴露时间延长,初期变形无法及时约束,进而诱发连锁失稳。爆破作业产生的振动波会进一步损伤已处于临界状态的岩体,扩大松动圈范围。更为关键的是支护时机的选择——软岩变形速率快,若初支滞后,围岩已进入加速变形阶段,此时再施加支护,不仅难以控制变形,还可能因被动受力而迅速破坏。实践反复证明,软岩隧道必须遵循“短进尺、弱爆破、早封闭、强支护”的原则,通过分步开挖、及时成环、快速封闭仰拱等措施,最大限度减少围岩暴露时间和扰动程度,从而将变形控制在可接受范围内。

3 软岩地层中的成洞条件分析

3.1 围岩自稳能力判据

软岩地层通常不具备自然成洞能力,但可通过若干工程指标进行初步判别。例如,当岩体质量指标(RMR)低于40或BQ值小于250时,表明岩体完整性差、强度低,难以形成有效承载拱;若通过钻孔电视或位移反演估算的松动圈厚度超过1.5米,则说明围岩已深度破坏,自稳时间极短;若监测数据显示日变形速率持续高于5毫米,亦预示存在持续大变形风险。这些判据虽非绝对,但可作为是否需要采取超前加固措施的重要依据。值得注意的是,自稳能力不仅取决于岩体本身,还与开挖跨度、埋深及支护响应速度密切相关,因此在评估时需结合具体工程条件进行动态判断。

3.2 应力-强度比判据

应力-强度比($SSR = \sigma_1/UCS$)是衡量围岩屈服程度的有效无量纲参数。当SSR小于0.3时,围岩基本处于弹性状态,变形可控,具备自然成洞条件;当SSR介于0.3至0.6之间时,围岩局部进入塑性区,需依赖及时支护限制变形发展;而当SSR超过0.6时,围岩大面积屈服,承载能力严重退化,成洞极为困难。在软岩隧道中,由于UCS值本身较低,即使埋深不大,SSR也可能轻易突破0.6阈值^[3]。例如,某埋深仅150米的隧道穿越UCS为8 MPa的炭质页岩,实测最大主应力达6 MPa,SSR已达0.75,施工中即出现严重挤压变形。因此,将SSR作为成洞可行性判据,有助于在设计阶段预判风险等级。

3.3 水文地质条件

水文地质条件是软岩能否成功成洞的决定性外部因素之一。地下水丰富、渗透性强、pH值异常(偏酸或偏碱)的环境会加速软岩劣化过程。理想的成洞前提包括:地下水位位于隧底以下或可通过排水有效控制;单位长度渗流量小于5升/分钟;无承压水头或突涌风险。若上述条件不满足,则必须在开挖前实施止水措施。例如,在富水断层带中,若不进行超前帷幕注浆,开挖后极易引发涌水携泥,导致掌子面失稳甚至灾难性坍塌。因此,“以排为主、堵排结合”的治水理念在软岩隧道中尤为重要,只有将水的影响降至最低,才能为围岩稳定创造基本条件。

4 软岩隧洞围岩稳定性控制对策

4.1 超前地质预报与动态设计

面对软岩地质的高度不确定性,超前地质预报是风险防控的第一道防线。应综合运用地震波法(如TSP)、电磁法(地质雷达)、红外探水及超前水平钻探等手段,对掌子面前方30至100米范围内的岩性变化、断层位置、富水区等进行精准探测。在此基础上,推行动态设计理念,即根据实际揭露的地质条件实时调整支护参

数、开挖工法及施工步序。同时，建立基于监测数据的预警机制，设定累计变形、变形速率、支护内力等关键指标的阈值，一旦超限立即启动应急预案。这种“预测—验证—反馈—优化”的闭环管理模式，是应对软岩复杂性的有效途径。

4.2 强化超前支护

超前支护的核心在于在开挖前对前方不稳定岩体进行预加固，形成“超前承载拱”。对于浅埋软岩或断层破碎带，大管棚支护可有效传递上覆荷载，防止地表沉降；在一般软弱围岩中，小导管配合水泥-水玻璃双液浆注浆，既能提高岩体强度，又能封堵渗流通道；而在富水砂层或淤泥质地层中，水平旋喷桩可形成连续止水帷幕，兼具加固与防水功能。超前支护的成功实施，关键在于注浆压力、扩散半径与胶凝时间的精确控制，确保加固体与原岩有效协同工作。

4.3 及时封闭成环

软岩隧道必须强调空间效应，尽早形成封闭的受力环。为此，宜采用分部开挖工法如CD法、CRD法或双侧壁导坑法，将大断面分解为多个小单元，逐个开挖、逐个支护。尤为重要的是仰拱的施作时机——仰拱应紧跟下台阶，距离掌子面不宜超过1.5倍洞径，以有效抑制底鼓并闭合初支结构^[4]。初支闭合成环后，其整体刚度显著提升，能更均匀地承担围岩压力，避免局部失稳。因此，“快封闭”不仅是施工组织要求，更是力学稳定需求。

4.4 优化支护结构

针对软岩大变形特点，支护结构需兼具高强度与适度可缩性。型钢钢架宜选用I20b及以上型号，间距控制在0.6米以内，以提供足够支撑刚度；同时可在拱脚或接头处设置可缩元件，允许围岩释放部分变形能，防止支护结构因刚度过大而脆性破坏。锚杆系统应由普通砂浆锚杆升级为全长粘结或预应力锚索，长度不少于6米，深入稳定岩体，形成“深锚固+浅支护”的复合体系。二次衬砌不宜过早施作，应在围岩变形基本稳定后（通常需30至60天）浇筑，以避免承受过大后期荷载。

4.5 综合治水措施

治水是软岩隧道成败的关键环节。洞内应设置完善的排水系统，包括环向盲沟、纵向排水管及中央排水沟，确保渗水及时引排，避免积水浸泡围岩。对富水区

段，需实施系统性注浆堵水，如全断面帷幕注浆或局部径向注浆，将围岩渗透系数降至 10^{-6} cm/s以下。同时，严格保护防水板施工质量，杜绝焊接破损或搭接不良，防止运营期渗漏再次软化围岩。只有实现“控水—排水—防水”三位一体，才能从根本上改善软岩工程环境。

4.6 监测与反馈

信息化施工离不开全面、连续的监测体系。应在关键断面布设收敛计、多点位移计、锚杆轴力计、钢架内力计及水压计等传感器，实时采集围岩变形与支护受力数据。通过对监测数据的回归分析与趋势外推，可预测最终变形量，评估支护有效性，并为后续段落施工提供参数依据。更重要的是，监测结果应及时反馈至设计与施工单位，实现“监测指导施工、施工验证设计”的良性循环，这是软岩隧道安全高效建设的根本保障。

5 结语

软岩地层隧洞围岩稳定性受多因素耦合影响，失稳机理复杂，成洞条件苛刻。本文结论如下：①软岩低强度、高变形、强流变及水敏性，致开挖后难形成有效承载拱，易大变形或塌方。②围岩稳定性受岩体强度、地应力、结构面、地下水及施工扰动综合作用，高地应力与地下水是关键诱因。③成洞条件需从岩体质量、应力-强度比、水文地质及施工可行性等多维度评估，不能仅凭经验。④稳定性控制应坚持“地质超前、主动支护、及时封闭、综合治理、动态反馈”原则，采用集成技术。未来应深化软岩流变本构模型、多场耦合数值模拟及智能预警系统开发，为复杂软岩隧道工程提供更精准技术支撑。

参考文献

- [1]曹宇,陈士银.软岩引水隧洞围岩稳定性分析[J].水利科技与经济,2023,29(01):73-76.
- [2]崔金鹏,杜威,鄢双红.红层软岩导流隧洞洞径与洞形对围岩稳定性影响研究[J].水利水电快报,2022,43(04):54-60.
- [3]刘洋.浸水软岩力学特性及隧道围岩稳定性研究[J].西部交通科技,2025,(07):206-209.
- [4]尚阳光.深埋软岩隧道围岩稳定性力学分析[D].安徽建筑大学,2024.