

高地应力条件下隧道大变形控制措施探讨

张毅杰

四川康新高速公路有限责任公司 四川 康定 626000

【摘要】：随着交通建设向复杂地质区域延伸，高地应力条件下隧道施工面临的大变形问题愈发突出，严重影响工程质量、施工安全及进度。本文基于高地应力隧道大变形的成因与特征，从超前支护、初期支护、二次衬砌及辅助控制等方面，系统探讨隧道大变形的关键控制措施，结合工程实践经验优化控制体系，为同类工程施工提供参考。

【关键词】：高地应力；隧道；大变形；控制措施；支护体系

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.019

1 引言

在深埋隧道或地质构造复杂区域施工时，高地应力的存在易导致隧道围岩出现显著变形，表现为拱顶下沉、边墙内挤、底板鼓起等现象。此类大变形若控制不当，可能引发钢拱架扭曲、喷层开裂甚至塌方等事故，增加工程返工成本与工期延误风险。近年来，国内外学者针对高地应力隧道变形控制开展了大量研究，但不同地质条件下的变形规律存在差异，控制措施需结合具体工程实际动态调整。因此，深入分析高地应力隧道大变形的控制要点，构建科学完善的控制体系，对保障隧道工程安全高效施工具有重要现实意义。

2 高地应力隧道大变形的成因与特征

2.1 核心成因

高地应力是隧道大变形产生的前提条件，当围岩应力超过其自身承载能力时，会引发围岩塑性流动或脆性破坏，进而导致大变形。从地质与施工角度分析，成因主要包括四方面。一是地质因素，围岩岩性软弱（如页岩、千枚岩、断层破碎带等）、结构面发育，易在应力作用下产生变形；二是水理因素，地下水的渗透与作用会进一步加剧变形风险，一方面地下水会软化围岩，降低其强度和承载能力，使围岩更易发生塑性流动，另一方面地下水的静水压力会增加围岩所受应力，打破原始应力平衡，尤其在断层破碎带等富水区域，该影响更为显著；三是应力因素，深埋隧道受上覆岩层自重、构造应力叠加影响，围岩应力显著升高，超过临界应力值后引发塑性变形；四是施工因素，开挖方式不合理、支护不及时或支护强度不足，会破坏围岩原始应力平衡，加剧变形发展。

2.2 典型特征

高地应力隧道大变形具有明显的时效性与累积性，初期变形速率快，持续时间长，总变形量显著大于常规隧道。不同岩性围岩的变形特征存在差异：软岩围岩以塑性流动为主，表现为边墙内挤、拱顶缓慢下沉，易出现喷层剥落、钢拱架变形；

硬岩围岩则可能因应力释放引发脆性破裂，伴随突发性变形与掉块。此外，大变形还具有空间分布不均性，断层破碎带、岩层交界面等区域的变形量远大于完整围岩区域。

3 高地应力条件下隧道大变形控制核心措施

高地应力隧道大变形控制需严格遵循“先柔后刚、分级支护、动态调整”的核心原则，其核心变形控制理念为“预留变形、先柔后刚、先放后抗”。基于此理念，需构建“超前支护+初期支护+二次衬砌+辅助措施”的综合控制体系，通过多维度协同作用，实现对围岩变形的有效约束，保障隧道施工安全与结构长期稳定。核心控制措施包括增大预留变形量、增强初期支护（如采用双层工字钢、HW型钢）、布设长短锚杆相结合、增设预应力锚杆（索）、采取超前导洞释放应力或优化断面形式、必要时进行换拱处理等，各措施需根据围岩实际情况协同搭配使用。

3.1 超前支护措施

超前支护是高地应力隧道大变形控制的首要环节，在实施前需强化超前地质预报工作，采用超前钻孔、TSP（隧道地震波超前地质预报）、地质雷达、瞬变电磁仪相结合的综合探测方法，精准掌握掌子面前方围岩的岩性、埋深、裂隙发育情况、含水状态及应力分布特征，据此科学选取超前支护参数，明确支护类型、布设规格及施工要点，确保超前支护的针对性与有效性。

超前支护的核心作用是提前加固掌子面前方围岩，阻断围岩风化进程与裂隙进一步发育，有效降低开挖扰动对围岩稳定性的影响，为后续开挖作业创造安全稳定的作业环境。具体适用场景与技术要点如下表所示。

表1 具体适用场景与技术要点

| 超前支护类型 | 适用条件 | 技术要点 | 加固效果 |
|--------|------|------|------|
|--------|------|------|------|

| | | | |
|---------|---------------------|---|-----------------------------------|
| 超前小导管注浆 | 中等埋深、围岩裂隙发育段、浅埋偏压段 | 小导管采用 ϕ 42~50mm 钢管, 长度 3~5m, 倾角 10° ~ 15° , 注浆压力控制在 0.5~1.5MPa | 注浆后形成加固圈, 提高围岩整体性, 阻断渗水通道 |
| 中管棚 | 高地应力大变形段、中等埋深的复杂围岩段 | 采用 ϕ 50~89mm 无缝钢管, 长度 5~8m, 环向间距 40~60cm, 注浆材料选用水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力 1.0~2.0MPa | 形成中等刚度支护结构, 兼顾支护强度与施工灵活性, 有效控制大变形 |
| 超前大管棚 | 深埋隧道、断层破碎带、软岩大变形段 | 管棚采用 ϕ 89~108mm 无缝钢管, 长度 8~15m, 环向间距 30~50cm, 注浆材料选用水泥-水玻璃双液浆 | 形成刚性棚架结构, 承载力强, 能有效约束围岩前期变形 |

(注: 续表 1)

3.2 开挖工法的控制

优先采用三台阶、两台阶等分步开挖工法, 结合监控量测动态增加预留沉降量。通过实时监测隧道围岩变形数据, 精准掌握围岩应力释放规律与变形趋势, 动态调整预留沉降量参数, 避免因预留不足导致后期结构受力异常或施工病害。优化断面设计, 将大断面划分为小断面, 合理分块开挖, 减小单步开挖断面尺寸, 显著提升开挖过程中断面的整体稳定性; 同时, 小断面开挖可实现快速封闭, 减少围岩暴露时间与扰动次数, 降低围岩塑性变形风险。优化施工工序, 梳理开挖、出渣、初期支护等关键工序的衔接逻辑, 减少工序间隔时间, 加快掌子面推进与支护闭合成环速度, 尽早形成完整的初期支护承载体系, 有效约束围岩变形。

3.3 初期支护强化措施

初期支护是控制高地应力隧道大变形的关键环节, 需严格遵循“强支护、早封闭”的核心原则, 在开挖完成后第一时间形成支护体系, 快速约束围岩塑性变形, 防止应力过度释放引发支护失效。强化措施核心在于加强监控量测频率、缩短监测断面距离, 基于动态监测数据实时调整支护参数; 针对高地应力大变形段, 可针对性采用长+短锚杆结合、径向注浆导管、预应力锚(索)中的一种或多种组合方式, 提升支护承载能力。具体优化与强化措施如下。

(1) 喷锚支护优化: 采用“喷射混凝土+系统锚杆+钢筋网”协同支护模式。喷射混凝土选用 C25~C30 早强混凝土,

厚度控制在 25~35cm, 采用分层喷射工艺, 第一层喷射厚度 5~10cm, 及时封闭围岩, 减少应力释放; 系统锚杆选用中空注浆锚杆, 长度 3~5m, 间距 60~80cm, 通过注浆增强锚杆与围岩的粘结力, 形成组合承载结构; 钢筋网采用 ϕ 8~10mm 钢筋, 网格尺寸 20×20cm, 铺设于喷层内侧, 提高喷层整体性与抗裂性。

(2) 钢拱架支护强化: 结合监控量测动态调整钢拱架类型。根据实时监测的围岩变形速率、应力变化等数据, 灵活选用工字钢, 双层工字钢/型钢; 纵向采用工字钢作为连接筋, 确保钢拱架之间连接牢固, 形成连续的纵向支护体系, 提升整体支护刚度。结合监控量测动态加强锁脚支护。根据围岩稳定性监测结果, 通过增加锁脚支护数量或增大型号的方式强化锁脚效果; 常用锁脚支护材料包括 42 小导管、76 钢花管、89 钢花管、108 钢花管等, 确保钢拱架底部稳固, 有效抑制钢拱架下沉与掌子面收敛变形。

拱架与围岩之间采用混凝土楔块楔紧, 避免出现空洞, 确保支护力均匀传递。初期支护封闭时间至关重要, 开挖循环进尺控制在 1~2m, 开挖后 12h 内完成喷锚支护与钢拱架安装, 形成封闭环, 减少围岩暴露时间, 阻断变形发展路径。

3.4 二次衬砌优化措施

二次衬砌作为隧道永久支护结构, 需在初期支护变形基本稳定后施工, 同时需预留足够的变形量, 避免后期变形导致衬砌开裂。衬砌参数设计根据围岩级别与变形预测结果, 优化衬砌厚度与配筋。高地应力软岩隧道的二次衬砌厚度宜采用 50~60cm, 选用 C30~C40 钢筋混凝土, 纵向与环向钢筋配筋率不低于 0.8%。衬砌施工前, 通过监控量测判断初期支护变形稳定性, 当变形速率小于 0.2mm/d 且累计变形量达到预测值的 80%~90%时, 方可进行二次衬砌施工。在衬砌与初期支护之间铺设防水板与缓冲层, 缓冲层选用泡沫板或土工布, 厚度不小于 10mm, 减少初期支护变形对二次衬砌的应力传递; 在衬砌施工缝与沉降缝处设置止水带与填缝材料, 增强防水性能与抗变形能力; 采用补偿收缩混凝土浇筑, 减少混凝土硬化过程中的收缩裂缝。

3.5 辅助控制措施

针对高地应力隧道大变形的复杂性, 需结合辅助措施提升控制效果。一是监控量测与动态调整, 在隧道开挖全过程设置拱顶下沉、边墙内移、围岩应力等监测点, 监测频率根据变形速率调整, 初期每 2~4h 监测一次, 变形稳定后每周监测一次, 根据监测数据及时优化支护参数, 确保支护体系与围岩变形需求精准匹配; 二是围岩卸压措施, 对变形剧烈段落, 采用径向注浆、超前卸压孔等方式, 释放围岩内部应力, 降低支护结构

受力,同时可配合掌子面台阶开挖卸压,进一步弱化高地应力对隧道结构的不利影响;此外,还可针对性采取围岩加固措施,如在破碎带或软岩段布设锚杆、锚索,增强围岩自身承载能力,形成“卸压+加固+动态支护”的综合控制体系。

4 结论

高地应力条件下隧道大变形控制需构建“超前加固、初期强支护、二次衬砌优化、辅助措施保障”的综合体系,核心在

于通过及时有效的支护约束围岩塑性变形,结合监控量测实现动态调整。超前管棚与注浆加固能提前改善围岩性能,强化初期支护形成封闭承载结构,优化二次衬砌参数预留变形空间,搭配卸压与工法优化等辅助措施,可显著提升变形控制效果。后续研究应结合数值模拟技术,精准预测不同地质条件下的隧道变形规律,进一步优化支护体系参数,推动高地应力隧道大变形控制技术向智能化、精细化方向发展。

参考文献:

- [1] 安普振.穿越断裂带隧道大变形控制技术[J].建筑科技,2025,9(10):89-94+98.
- [2] 何伊琦.高地应力软岩隧道大变形控制技术研究[J].科技创新与应用,2025,15(26):99-102.
- [3] 蒲自俊.隧道大变形控制及支护方式探究[J].大众标准化,2024,(05):72-74.