

高地应力软岩隧道大变形发生机理及控制措施研究

李国庆

云南交投集团云岭建设有限公司云南云岭桥梁智能建造有限公司 云南 昆明 650100

【摘要】：高地应力软岩隧道在开挖过程中常出现显著的大变形问题，其根源在于应力重分布与岩体软化效应的耦合作用。研究通过对围岩力学特性、应力演化规律及软化机理的系统分析，揭示了高地应力环境下塑性区扩展、蠕变效应与剪切破坏的演变过程。基于数值模拟与工程实测结果，识别了影响变形的关键因素，提出了分级让压与时效支护相结合的优化控制体系。该体系能够协调围岩与支护的受力关系，显著降低变形速率，提升结构稳定性，为高地应力软岩隧道的安全设计与施工提供了有效技术路径。

【关键词】：高地应力；软岩隧道；大变形；机理分析；控制措施

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.054

引言

高地应力区域的地下工程在建设过程中普遍面临围岩大变形与支护失稳等复杂问题。软岩因其强度低、塑性大及易软化特性，使隧道在受高地应力扰动时更易发生拱顶下沉、拱腰扭曲、拱底隆起等显著变形，严重影响施工安全与结构稳定。本文以会巧高速公路项目小坡头隧道为依托。传统的经验支护方法难以适应此类地质条件，导致支护超前或滞后、变形失控等现象频发。深入揭示软岩大变形的发生机理，构建科学合理的控制体系，是解决此类工程难题的关键。通过机理分析与控制对策研究，可为高地应力软岩隧道的设计与施工提供新的思路与参考。

1 高地应力软岩隧道变形特征与力学行为分析

高地应力条件下的软岩隧道在开挖过程中呈现出明显的非线性变形特征。由于地应力集中作用，围岩在初期阶段即产生塑性屈服，形成显著的卸荷区和压缩区。应力重分布使得岩体内部产生复杂的三向应力状态，局部剪切破裂逐渐演化为整体性变形，表现为拱顶下沉、拱腰扭曲与底鼓上拱等多向耦合形态。软岩因含水量高、结构面发育，易在高应力扰动下发生蠕变、软化、风化，其变形持续发展、难以收敛且变形量大的特征。此类变形往往伴随明显的时间效应与应变硬化阶段，支护结构承受不均匀荷载，易导致结构内力重分布和二次变形。

在高地应力环境中，围岩的力学响应具有显著的时变性与各向异性特征。岩体在受压状态下经历弹性、塑性到黏塑性阶段的演化，微裂隙扩展与矿物结构劣化促使强度衰减^[1]。受构造应力与围压共同影响，围岩剪切带逐渐形成并沿隧道周边扩展，导致支护结构难以有效约束变形。实验与现场监测表明，围岩弹塑性区的扩展方向与主应力轴一致，侧压力系数的变化

对变形模式具有决定性影响。尤其在软岩结构松散、节理面填充物遇水软化时，围岩刚度显著降低，拱腰部位成为应力集中与变形集中的关键区域。

隧道施工扰动引起的卸荷效应进一步加剧了变形特征。高地应力释放导致原岩应力重分布，局部形成瞬态应力集中，可能诱发岩爆或塑性流变。支护响应与围岩变形速率的不匹配，是引发大变形的重要因素。分析表明，软岩隧道变形受地应力、岩体强度及施工参数共同影响。全断面开挖易造成大面积瞬时卸荷，加剧变形；合理控制分部开挖的尺寸与进尺，则能引导应力分步释放，有利于控制。此外，爆破振动会损伤岩体完整性，而机械开挖扰动较小，施工方法需根据地层条件精准选择。

2 大变形产生的应力重分布与围岩软化机理

高地应力作用下，软岩隧道在开挖扰动过程中会引发围岩内部应力场的显著重分布。原有的三向压应力平衡状态被破坏，围岩产生径向卸荷与切向集中现象，形成明显的应力梯度带。应力集中区多分布在拱腰和拱顶部位，局部岩体受压超过屈服极限后进入塑性状态，进而引起剪切滑移与压剪破坏。高地应力下的能量释放速率较快，导致围岩微裂隙扩展加剧，岩体结构完整性降低，应力路径由压密型向膨胀型转变，形成蠕变变形与剪切破坏并存的复杂应力场特征。随着变形的发展，支护结构承载能力逐渐衰减，应力重新集中于残余未屈服区，使变形呈现出累积性与非线性特征。

围岩软化机理主要体现在岩体强度与变形模量的时变退化过程中。高地应力条件使岩体内部孔隙水压力升高，微裂纹间摩擦系数下降，矿物颗粒发生滑移与重排，导致结构面抗剪强度下降^[2]。软岩矿物成分中的蒙脱石、伊利石等遇水后膨胀，促使围岩产生水

化软化效应,进一步削弱岩体的黏结性能与抗压强度。

开挖扰动是触发应力重分布与软化的关键。支护滞后或不足易使开挖面前方高应力区岩体剥落、应力释放。卸荷导致围岩应力路径偏移、结构松弛与体积膨胀,有效应力下降,孔隙率增大,引发持续的蠕变—软化链式反应。施工中,开挖面暴露时间过长、排水不及时将显著加速软化进程。因此,控制暴露时间、及时封闭成环并做好防排水,是抑制软化的关键。不同围压与含水条件下,围岩表现出强度退化、流变加剧及持续变形的特征,最终形成大变形内在驱动力。

3 变形演化过程的数值模拟与关键影响因素识别

变形演化过程的数值模拟是研究高地应力软岩隧道大变形机理的重要技术手段。通过建立符合地质条件和围岩特性的数值模型,可以揭示变形的发展规律与关键控制因素。高地应力环境下,围岩的非线性力学特性显著,数值计算中需考虑弹塑性、黏弹性及蠕变效应的耦合关系。采用三维有限元或离散元模型能够较准确地反映应力重分布和塑性区演化过程。模型中对围岩参数的设定需充分体现岩体结构面、节理分布及软化特征,以保证计算结果与实际变形过程相符。

在模拟过程中,开挖扰动与支护响应的时序关系对变形演化具有决定性影响。不同的开挖步距和支护时机在模型中引发应力集中程度的差异,从而导致塑性区扩展速度与形态的变化。高地应力下的卸荷效应会引起局部应力集中区的应变突增,形成拱腰膨胀和拱顶下沉的典型变形模式。数值分析显示,当围岩处于强应力梯度区时,局部应变能积聚,支护体系若不能及时承载,会促使塑性带贯通,进而形成大范围蠕变变形。

数值模拟结果表明,围岩强度参数与应力水平的匹配程度是决定变形演化路径的关键。岩体黏聚力和内摩擦角的细微变化会引起应变区范围和变形速率的显著差异。当软化系数增大或围压降低时,塑性区扩展范围迅速扩大,围岩由稳定状态转入蠕变阶段,变形呈加速趋势^[3]。模型中的流变参数控制了变形的时间特征,蠕变指数越大,变形速率越高,支护结构的受力也更不均匀。通过参数反演与实测对比,可验证模型的合理性并识别主导性因素,如围压大小、埋深、岩性结构、含水条件及施工扰动强度等。

4 控制措施优化与分级让压支护体系构建

高地应力软岩隧道的大变形控制核心在于合理分配围岩与支护结构之间的承载关系,通过构建分级让压支护体系实现稳定控制与能量释放的平衡。高地应

力环境下,围岩处于高能量储备状态,若支护刚度过大或封闭过早,易造成能量无法充分释放,引发二次应力集中与结构破坏。控制措施的优化应以“柔性约束、分级承载、时效支护”为基本原则,在施工早期给予围岩适度变形空间,使其完成初期松弛后再施加约束,实现应力—应变曲线的平缓过渡。通过数值模拟结果表明,当让压量控制在30~50 mm范围内时,围岩塑性区扩展得到有效抑制,拱顶下沉量较未让压状态减少约40%,支护内力降低近35%,显示出较优的协同效应。

在支护体系设计中,应充分考虑围岩的分级响应特征。高地应力软岩的变形具有阶段性规律,早期以弹塑性变形为主,中后期进入蠕变与流变阶段,因此支护系统需具备可调刚度特性。初期支护可采用钢拱架与喷射混凝土组合结构,并配置让压螺栓与滑移连接装置,使其具备一定的可让压性能。中期支护阶段应引入能量吸收元件,如可控让压垫片或屈服支撑装置,使围岩在受压过程中逐步转移应力,实现“变形—吸能—稳定”的控制过程。监测数据表明,在采用分级让压支护的区段,围岩变形速率较传统刚性支护下降约60%,支护结构应力峰值延后出现,有效延长了稳定期。

控制措施优化需注重施工方法与应力释放的协调。推荐采用台阶法、中隔壁法等分部开挖方式,减少单次暴露面积,降低扰动强度^[4]。关键要控制开挖步距与支护时机,确保支护紧跟开挖面,支护滞后宜小于1.5m,以缩小塑性区约25%,减缓蠕变发展。施工应贯彻“短进尺、快封闭、强支护、勤量测”原则。
①优化开挖:采用三台阶七步或环形开挖留核心土等方法,循环进尺控制在0.5~1.0m,及时施作初期支护并封闭成环。
②精细支护:尽早施作系统锚杆(长8~15m)并可靠锚固;及时注浆,扩散半径0.5~1.0m,改良围岩形成承载拱。拱架需密贴围岩,大变形段采用双层钢拱架,拱脚设扩大基础(B单元)增强稳定性。
③加强仰拱与二衬:加大仰拱曲率半径与厚度,尽早浇筑形成闭合结构;二衬待变形基本稳定后施作。同时,应建立分区排水与防渗系统,控制地下水渗流与孔隙水压力,减轻围岩软化,抑制软化与变形的耦合效应。

为进一步提高支护体系的适应性,可引入信息化动态设计理念。通过实时监测拱顶下沉量、拱腰收敛量与锚杆应力变化,调整让压量与支护参数,实现反馈控制。基于监测数据的反演分析可识别围岩强度退化速率与蠕变特征,从而优化支护刚度分布与构件布

置。实践结果显示,在高地应力软岩隧道中采用动态分级让压体系后,围岩变形控制率提高至85%以上,支护构件残余应力降低20%~30%。该体系协调能量释放与支护时效,实现隧道长期稳定,为高地应力软岩隧道建设提供可行技术路径。见图1所示。

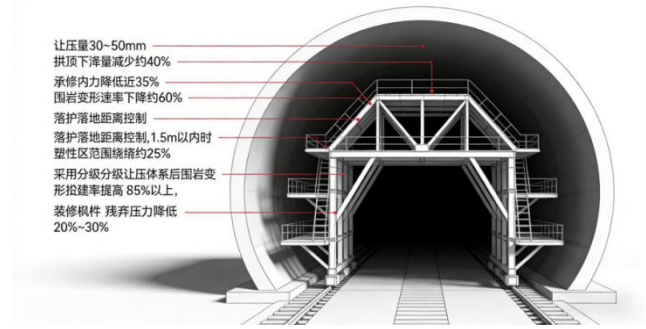


图1 让压支护效果参数对比图

5 工程应用验证与变形控制效果评估

工程应用验证是检验高地应力软岩隧道大变形控制有效性的关键。选取具有深埋、高应力及显著软化特征的典型工程段开展现场监测与对比分析,可全面评估分级让压支护体系的控制效果。该环境下围岩多出现拱顶下沉、拱腰鼓胀与底鼓复合变形。施工前,通过地质雷达与声波测试获取围岩参数,建立三维地质力学模型,对不同支护方案进行数值模拟比选,从而确定最优支护结构与让压控制量。现场实测与模拟结果高度吻合,验证了控制体系参数选取的科学性与合理性。

施工监测中,通过布设多点收敛计、拱顶下沉计及锚杆应力传感器,对隧道围岩与支护的变形过程进行全过程记录。数据结果显示,在分级让压支护条件下,围岩变形速率逐步减缓,变形曲线趋于平稳,支护构件应力分布均匀,未出现明显的二次集中现象

参考文献:

- [1] 田四明,李干,黎旭,等.基于能量释放控制的高地应力软岩大变形隧道主动支护设计研究[J].铁道标准设计,2025,69(10):1-8+45.
- [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] 杨坚.断层破碎区高地应力层状软岩隧道非对称大变形机制[J].铁道建筑技术,2025,(10):9-12+56.
- [4] 韩世龙.高地应力软岩TBM隧道大变形灾害发生规律与预警技术研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [5] 王亚楠,樊玲玲.高地应力软岩大变形隧道预应力锚索主动支护研究[J].铁路工程技术与经济,2025,40(03):44-52.

[5]。相比传统刚性支护区段,让压区段的变形控制效果更为显著,拱顶下沉量与拱腰收敛量均保持在可控范围内。现场观察发现,喷射混凝土层未出现贯通裂缝,钢拱架未发生屈曲失稳,说明结构与围岩形成了良好的协调承载状态。

工程实践表明,让压装置的延性吸能作用显著。可控滑移支座与屈服垫片可在围岩变形初期释放应力,促进内部应力平缓重分布。施工中依据实时监测数据,动态调整让压位移量与支护参数是关键主动控制手段。例如,变形速率超预警时适度增大让压量;变形平稳后逐步锁紧装置,提升支护刚度。通过此类动态调整,使支护体系与围岩变形持续协调。应力时程曲线分析显示,分级支护阶段应力增速明显减缓,围岩与支护间应力传递更趋协同。地应力实测表明,应力峰值向深部转移,浅层应力集中有效缓解,结构趋于稳定。

在控制效果评估中,变形时效性与围岩稳定性被作为主要判据。通过长期监测结果分析,围岩变形趋于收敛,拱顶下沉与周边收敛速率逐渐减小,围岩结构由蠕变阶段过渡到稳定阶段。支护体系未出现失稳或破坏,支护构件应力保持在设计允许范围内,说明控制措施满足工程安全与耐久性要求。

6 结语

高地应力软岩隧道的大变形问题具有显著的时空耦合特征和复杂的力学机制。通过对变形机理、应力重分布、软化效应及数值模拟的系统研究,明确了变形演化的内在规律,并提出了分级让压与优化支护相结合的控制体系。工程验证结果表明,该体系能够有效协调围岩与支护的受力关系,显著降低变形速率,提升结构稳定性,为高地应力软岩隧道的安全施工与长期运营提供了可靠的技术支撑。