

膨胀性围岩隧道开挖后变形规律及初期支护优化探讨

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】：膨胀性围岩隧道在开挖过程中受应力重分布与吸水膨胀共同影响，易产生复杂变形，严重威胁结构稳定与施工安全。通过分析岩体膨胀机理与力学特性，揭示了其变形的阶段性、非线性及空间差异规律。研究结合数值模拟与现场监测，探讨地应力、水文条件、矿物组成及支护刚度对变形的敏感性影响。基于力学耦合特征，提出柔性性与刚性结合的初期支护优化思路，通过合理调整喷射混凝土厚度、钢拱架间距及排水结构，实现支护结构与围岩的协调受力。工程实例验证表明，该优化体系能显著减小围岩变形幅值，提升隧道整体稳定性，为膨胀性软弱围岩隧道的施工安全设计提供了科学依据与技术参考。

【关键词】：膨胀性软弱围岩；隧道开挖；变形规律；初期支护；优化设计

DOI:10.12417/2811-0528.26.05.052

膨胀性围岩在地下工程中广泛分布，其物理与力学特性对隧道结构稳定性影响显著。隧道开挖后，岩体吸水膨胀与应力释放相互作用，常导致围岩变形加剧甚至支护失稳，成为施工质量控制的关键难题。研究表明，膨胀性围岩的变形呈现快速发生、延迟发展与不断积累的规律（围岩抗压强度低、自稳能力差；变形速度快、变形量大；持续实际长、具有明显的时间效应；松动圈范围大；围岩压力大），传统支护设计往往难以适应这种复杂变化。本文以南景高速公路项目宝华隧道为依托。通过深入探讨开挖后的变形规律，明确变形主控因素与演化路径，可为初期支护优化提供科学依据。合理的支护体系能够在早期阶段有效约束围岩变形，提升隧道整体稳定性，为工程安全施工提供重要保障。

1 膨胀性围岩特征及变形机理分析

膨胀性围岩在地下工程中表现出显著的时变与非线性特征，其变形机理受到岩体矿物组成、含水特性及围压条件的多重影响。此类岩体通常富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物，晶层结构易吸附水分并引起体积膨胀，形成显著的湿胀效应。开挖扰动使原有地应力体系重新分布，导致围岩应力集中与结构松弛共存，进而诱发裂隙扩展与剪切变形。膨胀过程中，岩体强度和模量逐渐降低，局部区域产生塑性破坏，形成软化带，使变形具有持续性与累积性。

在隧道开挖阶段，围岩卸压后形成径向膨胀趋势，伴随水化反应导致结构层间滑移与微裂隙贯通，进一步加剧围岩松动范围。若排水与支护不及时，吸水膨胀将引发应力集中反复转移，产生二次变形甚至拱顶下沉^[1]。应力应变试验与原位监测表明，膨胀性围岩的变形曲线呈明显非线性阶段特征，早期为快速膨胀段，中期为缓慢蠕变段，后期进入稳定或再次活化阶段。不同膨胀潜势的岩体在开挖扰动下表现出差异化的变形速率和方向性，这种非均匀变形使支护结构受力复杂，易出现局

部屈曲或破坏。

2 隧道开挖后围岩变形规律研究

隧道开挖后，膨胀性围岩的变形过程具有显著的阶段性与非线性特征。围岩在原始地应力平衡被打破后，产生卸荷膨胀与剪切滑移的复合变形，初期以径向膨胀为主，后期逐渐表现出环向收敛与拱顶下沉的协同效应。围岩变形的发展规律与应力释放速率、地下水渗入程度及岩体膨胀潜势密切相关。开挖扰动使围岩产生应力重分布，高应力区逐步向深部转移，低应力区形成松弛带，导致围岩变形具有明显的空间差异性和时间延迟性。

在变形初期，围岩内部裂隙迅速扩展，岩体结构处于强烈的卸载状态，应力应变曲线呈现陡降特征，形成明显的塑性变形区。随着时间推移，水分渗入使膨胀矿物吸水膨胀，体积进一步增大，产生额外的膨胀应力。此阶段的变形速率减缓但持续性增强，出现蠕变特征。部分区域因水化反应活跃，产生二次膨胀效应，使变形呈阶段性活化趋势。监测数据显示，膨胀性围岩的变形曲线往往呈多峰形态，反映出膨胀与收缩交替作用下的复杂变形机制。

从空间分布上看，围岩变形以拱顶及两侧墙体为显著部位，拱脚及底板区域则表现为反向变形或局部隆起^[2]。由于膨胀力分布不均，支护结构受力出现非对称性，喷射混凝土层及钢拱架常在变形集中区产生裂隙或脱空现象。围岩与支护体系之间的相互作用构成复合变形体系，若支护刚度不足，将导致变形累积加剧，甚至引发拱顶掉块或衬砌失稳。

从时间效应分析，膨胀性围岩变形可分为快速发展、缓变与稳定三个阶段。前期主要由应力卸载控制，中期受水化膨胀与蠕变主导，后期在支护约束与自重平衡下趋于稳定。施工工艺显著影响变形演化，分步开挖、短进尺、快封闭的工法可有

效控制围岩暴露时空,降低应力释放强度。例如,三台阶预留核心土法通过核心土抑制掌子面挤出变形,并为初期支护快速成环提供条件,从而显著抑制拱顶沉降与侧墙收敛。施工中,循环进尺宜控制在0.5~1.0m,及时施作仰拱封闭,缩短围岩自由变形时间。开挖后立即喷混凝土封闭岩面,可减缓膨胀矿物吸水反应。

3 影响变形的主要因素与参数敏感性分析

膨胀性围岩隧道的变形受多种因素综合作用,其控制机理复杂且具有显著的敏感性。围岩膨胀潜势、含水率、地应力状态、结构面特征以及支护参数等均对变形发展起关键作用。在相同地质条件下,不同参数的微小变化可能导致变形量的显著差异,因此对主要影响因素的识别与敏感性分析具有重要意义。实验与数值模拟结果表明,膨胀率与含水率之间存在非线性关系,当含水率由6%增加至12%时,体积膨胀率可由2.1%增至6.7%,表现出明显的放大效应。矿物组成中蒙脱石含量的变化同样显著影响变形特征,当含量超过25%时,膨胀应力增长速率呈指数上升,围岩模量下降幅度可达40%以上。

地应力条件对变形过程的主导作用尤为突出。现场监测数据显示,在围压由1.2MPa增至2.0MPa时,径向变形速率下降近一半,但蠕变持续时间延长约30%。这种现象表明高应力环境能够一定程度约束膨胀变形的初期发展,却在长期阶段促使变形更趋稳定延伸。应力场分布的不均匀性使拱顶与侧墙受力差异明显,局部高应力区成为裂隙扩展与塑性变形的集中部位。地应力方向与隧道轴线夹角的变化同样影响变形模式,当夹角由0°增至30°时,围岩偏压效应加剧,拱顶下沉增幅超过15%,而侧墙收敛量增加近20%。水文地质条件是影响膨胀变形的关键外部因素^[3]。渗透试验表明,当地下水渗透系数由 1×10^{-7} m/s提高至 5×10^{-6} m/s时,膨胀率平均提升2.8倍,说明水流通道的存在可显著加快水化反应速率。围岩吸水膨胀与孔隙压力变化形成应力耦合效应,使得变形呈现时空非均匀分布特征。排水系统失效或渗漏将导致局部膨胀压力激增,引起衬砌结构的二次应力集中。

支护参数的配置对变形控制效果高度敏感。数值模拟分析表明,喷射混凝土厚度由18cm增加至24cm时,最大径向变形减小约32%,而钢拱架间距由0.6m增至1.0m则使拱顶位移增大近40%。支护刚度越高,初期阶段的变形控制效果越明显,但若刚度过大,将导致膨胀应力难以释放,出现局部应力集中。不同参数组合的灵敏度排序结果显示,含水率与支护刚度为最主要的影响因子,其次为地应力水平和渗透系数,结构面倾角影响较次但在局部不稳定区具有放大作用。综合敏感性分析表明,膨胀性围岩隧道的变形控制需从水-应力-支护三要素协同出发,建立动态调节机制,以实现复杂膨胀环境下变形演化

的有效抑制。见图1所示。

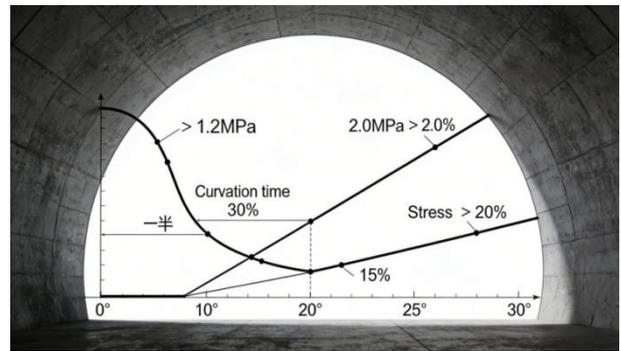


图1 影响围岩变形的关键参数敏感性示意图

4 初期支护体系优化与参数设计方法

初期支护体系的优化设计在膨胀性围岩隧道中具有决定性意义,其核心目标在于通过结构参数的协调匹配与材料性能的合理配置,使支护体系在控制变形与释放应力之间形成平衡。膨胀性围岩的特殊性决定了支护体系应具备一定的柔顺性与延展性,既能抵抗膨胀力,又能避免刚性约束导致的二次破坏。支护体系设计需从围岩的膨胀潜势、力学参数、地应力条件及渗透特征出发,通过数值分析与现场反馈相结合,建立动态调整机制,使支护参数能够适应不同阶段的变形需求。

支护优化的关键在于掌握围岩的时变响应规律。早期阶段应注重支护时机的控制,支护过早会限制围岩自稳能力的发挥,过晚则可能导致不可逆的变形积累。合理的支护时机应在围岩应力释放达到稳定临界值后立即实施,以实现围岩与支护结构的协同承载。喷射混凝土层作为主要承载构件,其厚度和配筋率直接影响结构刚度与变形适应性^[4]。采用高延性纤维混凝土可有效改善抗裂性能,提高结构对膨胀应力的吸能能力。钢拱架的间距与截面形式应结合变形分布特征进行优化,形成多层次、渐进式的受力体系,以降低单点应力集中风险。

在支护结构与围岩的相互作用中,柔性支护理念的引入成为控制膨胀性变形的重要途径。通过可变刚度设计,使支护结构在初期具备一定变形容纳能力,待围岩稳定后逐步增强约束力。锚杆与锚索的布置应兼顾加固范围与应力传递路径,宜采用等间距、径向分布的复合锚固形式,以形成有效的加筋体结构。衬砌体系需与初期支护形成受力互补关系,采用可调节衬砌厚度与可卸载环设计,可实现分阶段受力与能量耗散的平衡。

在施工过程中,支护结构的安装时机、工艺顺序及与围岩的密贴程度直接影响支护效果的发挥。喷射混凝土应紧跟开挖面施作,采用湿喷工艺保证厚度均匀、密实,并宜添加速凝剂以尽早形成承载能力。钢拱架安装需确保拱脚牢固支撑于坚实

基岩或扩大垫板上,必要时采用锁脚锚管(如 $\Phi 89$ 钢管)进行加固,以增强其纵向稳定性及抗偏压能力。对于膨胀性围岩段落,可采用分阶段、可调节的支护施工策略:初期采用刚度较低的柔性支护(如格栅钢架配合薄层喷射混凝土)允许围岩适度变形释放应力;待变形进入缓变阶段后,及时增强支护(如架设型钢拱架、增厚喷层或施作二次衬砌),实现“先柔后刚、动态加强”的支护效果。施工中还需重视排水系统的同步实施,在支护层背后设置盲管、防水板及纵向排水沟,形成有效排水通道,降低围岩含水率,从根源上抑制膨胀变形发展。

支护参数设计需综合考量结构安全、施工工艺与材料性能。喷射混凝土应兼顾强度与延性,优化配合比以控制水化影响。防水排水系统须与支护体系协同设计,形成封闭导排的联合防护机制。通过监测反馈与数值反演,可动态优化支护参数,使其在应力演化中保持安全储备。关键要关注支护刚度与围岩膨胀力的耦合效应,通过参数灵敏度分析明确控制指标,实现力学响应与结构安全的最佳平衡,从而构建具备高适应性、可调节性的支护体系。

5 工程实例验证与效果评估

工程实例验证对评估支护体系有效性至关重要。在某膨胀性泥质岩隧道中,针对围岩膨胀特征,采用了三台阶短进尺(0.6m)、调整台阶高度和开挖掘数来改变岩体的内摩擦角、及时初喷封闭、架设格栅钢架并快速封闭仰拱的施工工艺。辅以扩大拱脚、锁脚锚管加固、可收缩连接构件及系统排水盲管等措施,实现了“快挖、快支、快封闭”。监测显示,变形集中于拱顶与侧墙,初期速率高,随支护成环明显趋缓,证实了

综合施工控制措施的有效性。

现场数据与数值模拟结果进行了对比分析,表明优化后的支护参数能够有效降低变形峰值,变形曲线呈现由快速上升向平缓发展的转变。通过分区分析发现,支护刚度的合理分布在抑制局部膨胀应力集中方面具有显著效果,尤其在岩体膨胀潜势较高的区域,支护体系的延性设计可使应力在时间上逐步释放,从而避免结构的突发失稳^[5]。锚固体系的应力分布与围岩变形保持一致,形成协同承载效应,使整体受力更加均衡。

施工期监测采用了多点位移计、表面收敛计及内部应变计相结合的手段,通过实时监测对比不同施工阶段的变形特征,发现变形主要集中在开挖后14天内,支护结构在该阶段起到决定性控制作用。排水系统的完善配置有效缓解了吸水膨胀的持续性影响,使水化反应趋于稳定,围岩蠕变速率显著下降。根据现场数据反演结果,支护结构内部应力分布均匀,未出现塑性区扩展现象,说明支护体系在力学协调方面达到了预期效果。

6 结语

膨胀性围岩隧道的变形控制与支护优化是地下工程领域的重要研究方向。通过对膨胀性围岩的变形机理、规律及影响因素进行系统分析,可深入揭示力学响应与水化作用的耦合关系。基于此提出的初期支护优化与参数设计方法,经工程实例验证具有良好的适应性与安全性。研究结果说明,通过动态支护设计与现场反馈调控,可实现对膨胀性围岩变形的有效抑制,为隧道工程在复杂地质条件下的安全施工与长期稳定提供了可行路径与技术支撑。

参考文献:

- [1] 成泽林.富水软土地层明挖隧道基坑降水开挖变形规律研究[D].安徽理工大学,2025.
- [2] 张凯.膨胀性围岩隧道相似模型试验及锚固支护研究[D].兰州大学,2024.
- [3] 门鹏程.软弱地层隧道开挖变形特征及控制技术研究[D].山东科技大学,2023.
- [4] 陈国富.膨胀性围岩隧道衬砌结构安全性评价[J].煤炭技术,2017,36(07):292-295.
- [5] 吕志涛,吴庚林,靳晓光,等.隧道膨胀性围岩蠕变特性分析及参数反演[J].地下空间与工程学报,2016,12(06):1504-1510.