

深厚红层软岩地基开挖过程中蠕变特性 及支护结构受力分析

张博, 李迷

长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2026010023

摘要 : 为解决深厚红层软岩遇水软化、强度低、蠕变显著的工程特性给地基开挖带来的长期稳定性难题, 本文围绕开挖扰动下软岩蠕变特性及支护结构受力演化展开系统研究。分析了基坑开挖的“卸荷-软化-应力重分布”力学效应, 以及红层软岩应力-应变场的时间依赖性, 明确蠕变三阶段演化规律及本构模型适配需求; 进而探讨了土钉墙、排桩、地下连续墙等常见支护结构的作用机理, 揭示了围岩与支护“变形协调-应力传递-动态平衡”的长期耦合关系及支护结构的时空受力特征; 随后采用FLAC3D与Midas GTS NX软件, 基于工程实际建立数值模型, 设计开挖速率、含水率、支护形式、初始应力四类对比工况, 开展360天长期耦合模拟。研究旨在为深厚红层软岩地基开挖工程的支护设计优化与长期稳定性控制提供理论依据和技术支撑。

关键词 : 深厚红层软岩; 地基开挖; 蠕变特性; 支护结构

Creep Characteristics and Stress Analysis of Support Structures During the Excavation of Deep Red-Bed Soft Rock Foundations

Zhang Bo, Li Mi

Changjiang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : To address the long-term stability challenges in foundation excavation caused by the engineering properties of deep red-bed soft rock, such as water-induced softening, low strength, and significant creep, this paper systematically investigates the creep characteristics of soft rock under excavation disturbance and the stress evolution of support structures. It analyzes the mechanical effects of "unloading-softening-stress redistribution" during foundation pit excavation, as well as the time-dependent stress-strain field of red-bed soft rock, clarifying the three-stage creep evolution law and the requirements for constitutive model adaptation. Furthermore, it explores the action mechanisms of common support structures such as soil nail walls, row piles, and diaphragm walls, revealing the long-term coupling relationship of "deformation coordination-stress transfer-dynamic equilibrium" between surrounding rock and support, along with the spatiotemporal stress characteristics of support structures. Subsequently, numerical models are established using FLAC3D and Midas GTS NX software based on actual engineering conditions, with four types of comparative conditions designed for excavation rate, water content, support form, and initial stress, enabling a 360-day long-term coupled simulation. The research aims to provide theoretical foundations and technical support for the optimization of support design and long-term stability control in excavation projects of deep red-bed soft rock foundations.

Keywords : deep red-bed soft rock; foundation excavation; creep characteristics; support structure

引言

红层软岩具有透水性弱、亲水性强、遇水易软化膨胀、失水易崩解收缩且强度偏低的特殊工程特性, 加之显著的蠕变效应, 使得深厚红层软岩地基开挖过程中, 极易出现初始应力场失衡、围岩长期变形累积、支护结构受力超限等问题, 严重威胁工程长期稳定性, 甚至引发基坑坍塌、地基失稳等安全事故, 成为制约相关工程建设质量与效益的关键瓶颈。基于此, 本文聚焦深厚红层软岩地基开挖过程中的核心技术难题, 以“蠕变特性-应力演化-支护受力”为主线, 采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 系统探究开挖扰动下软岩蠕变三阶段演化规律、围岩与支护结构的动态耦合机制, 并通过多工况对比明确关键影响因素的作用效应。

一、开挖扰动下红层软岩地基应力场与蠕变场分析

(一) 基坑开挖的力学效应

红层软岩是一种特殊岩体,红层中泥岩、页岩、粉砂质泥岩等泥质岩为软岩,具有透水性弱、亲水性强,遇水易软化(或膨胀),失水易崩解(或收缩),强度低(岩块单轴饱和抗压强度 $\leq 30\text{MPa}$)的特点^[1]。红层软岩地基开挖的核心力学效应体现为初始应力场平衡状态的破坏与二次应力重分布,该过程与红层软岩高孔隙率、低弹性模量、遇水易软化的工程特性深度耦合^[2]。开挖作为卸荷过程,破坏了岩体的初始应力平衡,引发瞬时回弹和应力重分布,并在基坑转角等几何突变处形成高度应力集中,导致软岩因强度低而易于塑性屈服。同时开挖使岩体暴露,遇水后力学性能急剧劣化,这进一步加剧了应力集中的不利影响和变形发展,形成“卸荷-软化-应力重分布”的恶性循环,持续威胁地基的长期稳定性。

(二) 考虑蠕变效应的围岩应力-应变场时变分析

红层软岩显著的蠕变特性使得围岩应力-应变场呈现强烈的时间依赖性,其整体演化过程是瞬时变形与长期蠕变变形的叠加结果^[3]。蠕变过程通常经历初始、稳态和加速三个阶段,其中稳态蠕变因持续时间长、变形量显著,成为长期变形的主体。在蠕变作用下,围岩内部应力始终处于动态重分布状态,高应力区逐渐向深部转移消散,应力场呈现“动态平衡”的循环演化特征^[4]。同时应变场在时空上表现为非线性增长,其速率和影响深度受含水率和初始应力水平控制^[5]。为精准描述这一复杂过程,必须采用西原模型等能反映软岩蠕变特性的本构模型,通过确定关键参数,实现“应力-时间-应变”的三维耦合计算,从而准确揭示围岩的时变演化规律。

二、支护结构受力与变形的长期演化分析

(一) 常见支护结构形式及其作用机理

针对深厚红层软岩地基的蠕变特性、低强度及遇水软化等工程特点,常见支护结构的设计核心在于兼顾瞬时卸荷变形约束与长期蠕变变形控制,通过不同结构形式的力学特性适配软岩地基的长期力学响应^[6]。不同支护结构通过其力学特性适配这一需求,土钉墙通过加固浅层岩体并改善其整体性,适用于中等深度基坑;排桩依靠其刚性抵抗瞬时变形,并利用弹性适应长期蠕变,适用于深基坑;地下连续墙则以其高刚度和良好防渗性,有效约束深部蠕变并隔绝地下水,是超深基坑的核心支护;锚杆(索)通过施加预应力主动约束变形,常与桩墙结构结合,形成“主动约束-被动承载”体系。联合支护通过整合多种结构优势,实现对红层软岩地基变形的全方位、分层次控制。

(二) 围岩-支护结构相互作用机理

红层软岩地基中围岩与支护结构的相互作用本质是“变形协调-应力传递-动态平衡”的长期耦合过程,其核心逻辑在于支护结构通过自身力学响应适应围岩的瞬时变形与长期蠕变,同时围岩的应力演化反作用于支护结构的受力状态,二者形成动态依存关系^[7]。开挖初期,支护被动承受围岩的瞬时卸荷变形;围岩的长期蠕变变形持续传递应力,使支护受力增长,而支护的约束又反作用于围岩,形成“蠕变-应力累积-约束反馈”的循环。这一过程受接触面力学特性影响,软岩软化可能导致参数衰减,引

发滑移或脱空^[8]。围岩的蠕变阶段与支护响应深度耦合:若进入加速蠕变阶段,支护将面临超载风险;而支护刚度的长期衰减也会加剧围岩蠕变,二者可能形成恶性循环,导致整体失稳。

(三) 支护结构长期受力特征分析

红层软岩的长期蠕变与环境耦合效应,使得支护结构的受力与变形呈现显著的时间依赖性和空间差异性,其长期演化规律与软岩蠕变特性、支护形式及相互作用机理密切相关。从时间上看,其受力演化分为三个阶段,初期快速承受卸荷压力,中期随围岩蠕变而应力累积,后期若蠕变加速或环境恶化则面临失稳风险。空间上,基坑转角等应力集中区及深层支护结构受力更大^[9]。地下水渗透和温度变化等环境因素会加剧软岩劣化,进一步恶化支护受力状态。不同支护形式响应各异:柔性支护(如土钉)能适应蠕变但变形较大,而刚性支护(如地连墙)约束力强但长期应力累积效应明显,更易发生疲劳破坏。

三、基于数值模拟的蠕变与支护受力耦合分析

(一) 数值模拟软件与计算原理

针对深厚红层软岩地基开挖-蠕变-支护耦合问题的复杂性,选取FLAC3D与Midas GTS NX作为核心模拟软件,二者均具备强大的岩土体非线性力学模拟能力与多场耦合分析功能,适配软岩蠕变特性与支护结构相互作用的数值求解需求^[10]。FLAC3D基于显式差分法,擅长处理大变形和内置蠕变模型,能精准刻画软岩的时间依赖性行为;Midas GTS NX则凭借可视化建模和多场耦合优势,便于实现复杂支护体系的全过程协同模拟。计算的核心是围绕“卸荷-蠕变-支护约束”的耦合逻辑,分步模拟开挖卸荷与应力释放;代入蠕变参数,通过时间步迭代计算围岩的长期变形演化;通过设置不同单元模拟支护结构,实现其与围岩的应力动态传递,从而还原整个工程过程的力学响应规律。

(二) 数值模型的建立

数值模型的建立以工程实际地质勘察资料与设计方案为依据,重点保障模型的几何相似性、参数真实性与边界合理性。模型几何范围的确定需考虑开挖扰动的影响深度,横向取基坑开挖宽度的3-5倍,竖向取开挖深度的2-3倍,避免边界效应对计算结果的干扰,同时按实际基坑尺寸、边坡坡度、支护结构布置形式构建几何模型。网格划分采用分区加密策略,基坑侧壁、支护结构周边及应力集中区域采用高精度网格,确保局部力学响应的计算精度;远离基坑的围岩区域采用粗网格,平衡计算效率与结果准确性,整体网格类型选用四面体或六面体单元,保证单元质量满足数值计算收敛要求。岩体物理力学参数通过室内试验与现场原位测试确定,包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等常规参数,以及蠕变本构模型所需的弹性系数、黏弹性系数、黏塑性系数等,同时考虑含水率对参数的影响,按实际含水率状态调整软化后的力学参数。支护结构参数依据设计文件输入,钢筋混凝土构件需明确抗压强度、抗拉强度、弹性模量等材料参数,以及桩径、壁厚、配筋率等几何参数;土钉、锚杆需输入杆体抗拉强度、弹性模量、锚固段长度、注浆体黏结强度等关键参数。边界条件设置为,模型底部施加固定约束,侧面施加水平约束,顶部为自由面;初始应力场按自重应力+深部构造应力叠加施加,竖向应力按岩土体自重计算,水平应力根据侧压力系数确定,确

保初始应力状态与实际地质条件一致。

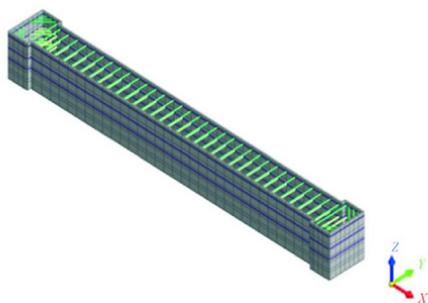


图1 基坑支护模型图

(三) 模拟工况设计

为系统分析不同因素对红层软岩蠕变特性及支护结构受力的影响,结合工程实际潜在变量,设计多组对比工况,各组工况仅改变单一变量,其余参数保持一致,确保变量影响的独立性与可对比性。基准工况设定为,常规开挖速率、天然含水率状态、标准联合支护体系、中等初始应力水平,作为后续对比分析的基准参照。变量工况主要包括四类,开挖速率工况,设置快、中、慢三种开挖速率,探究卸荷速率对围岩蠕变启动时间、变形量及支护初始受力的影响;含水率工况,设置干燥、天然(基准)、饱和三种含水率状态,分析软岩软化效应与蠕变特性的关联性,以及对支护受力的间接影响;支护形式工况,分别设置土钉墙、排桩、地下连续墙、排桩+锚杆、地下连续墙+锚杆五种支护形式,对比不同支护体系的长期变形约束效果与受力演化规律;初始应力工况,对应基坑开挖深度20m、30m、40m(高应力)三种场景,探究初始应力水平对围岩蠕变阶段特征及支护长期应力累积的影响。所有工况的模拟时间均设置为360天,覆盖围岩初始蠕变、稳态蠕变阶段,确保捕捉长期力学响应规律,各工况的计算步长根据蠕变阶段调整,初始蠕变阶段采用小步长,稳态蠕变阶段采用大步长,兼顾计算精度与效率。

表1 模拟结果对比表(360天)

工况	总蠕变量 (mm)	稳态蠕变速率 (mm/d)	应力集中系数	支护最大轴力 (kN)
基准工况	85	0.12	1.8	1250
饱和含水率	145	0.25	2.3	1850
慢开挖速率	65	0.10	1.6	1050
高初始应力	130	0.28	2.1	1600
地连墙+锚杆	70	0.09	1.5	950

(四) 模拟结果分析与讨论

模拟结果分析围绕围岩蠕变特性、应力场演化、支护结构受

力三个核心维度展开,结合时间序列与空间分布特征,对比不同工况差异,揭示关键影响因素的作用机制与规律。围岩蠕变变形结果显示,基准工况下围岩蠕变曲线呈现明显的三阶段特征,初始蠕变阶段变形速率快速衰减,累计变形量占总变形量的30%~40%;稳态蠕变阶段变形速率趋于恒定,累计变形量占总变形量的50%~60%;300天后逐渐进入加速蠕变初期。对比不同工况,饱和含水率工况的围岩总蠕变量较基准工况增加60%~80%,且加速蠕变阶段提前到来,表明软岩软化显著加剧蠕变变形;慢开挖速率工况的初始蠕变量较快开挖速率工况减少25%~35%,稳态蠕变速率降低15%~20%,说明缓慢卸荷可有效抑制围岩蠕变发展;高初始应力工况的稳态蠕变速率是低应力工况的2~3倍,验证了初始应力对蠕变变形的促进作用。围岩应力场演化结果表明,蠕变过程中基坑侧壁应力集中区逐渐向深部转移,转移深度与蠕变量正相关,饱和含水率工况的应力转移深度较基准工况增加30%~40%,而联合支护工况可使应力集中系数降低20%~25%,说明支护结构能有效分担围岩应力、缓解应力集中。支护结构长期受力结果显示,不同支护形式的受力演化规律差异显著,地下连续墙+锚杆联合支护的最大轴力、弯矩峰值较单一排桩支护降低35%~45%,且长期应力累积速率更为平缓,体现了“刚性约束+主动预应力”的协同优势;土钉墙支护的应力增长速率虽慢,但长期变形量较大,仅适用于浅基坑或蠕变不显著的场景;排桩支护的桩顶与桩身中下部长期处于高应力状态,易出现局部应力集中,需加强配筋设计。

四、结束语

本文针对深厚红层软岩遇水软化、蠕变显著的核心工程难题,以地基开挖与支护系统的长期稳定性为目标,通过理论分析与数值模拟相结合的方法,系统完成了红层软岩蠕变特性、开挖应力场演化及支护结构受力规律的研究。文章丰富了红层软岩地基力学与支护工程的理论体系,为相关工程的支护设计优化、施工参数调整及长期稳定性控制提供了直接的技术支撑,有效降低了基坑失稳、支护超限等风险,对推动红层分布区重大工程的安全高效建设具有重要实践意义。未来可进一步结合现场长期监测数据,优化蠕变本构模型参数,提升模拟结果的工程适配性;同时开展水-热-力多场耦合下的蠕变特性研究,探索新型抗蠕变、抗软化支护材料与结构形式,为深厚红层软岩地基工程的长期稳定性控制提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1] 郭俊彦. 某高速铁路红层软岩地层深路堑基底变形规律数值模拟研究 [D]. 兰州交通大学, 2020.
- [2] 钟志彬, 李安洪, 吴沛沛, 等. 红层软岩高速铁路路基长期拱变形机理研究 I: 变形特征 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3625-3637. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222065.
- [3] 张腾飞. 红层软岩路堑高边坡多级框架锚杆设计计算方法研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2014.
- [4] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 327-340. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0423.
- [5] 王原, 秦富, 王阳光, 等. 基坑红泥岩开挖施工工艺分析 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(1): 23-25. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2024.1.008.
- [6] 冯永红. 软土地基超深基坑土方开挖的监测与有限元分析 [D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- [7] 朱秦耀. 斜向支撑与竖向排桩组合基坑支护体系受力特性研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2023.
- [8] 龙柯宇. 软土深基坑咬合桩围护结构的施工变形特性分析 [D]. 四川: 成都理工大学, 2016.
- [9] 杜家论. 软土超大基坑开挖扰动位移时效特性及其评价方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [10] 徐辉雄. 软土地区深基坑多锚撑支护变形分析 [D]. 中国地质大学(武汉), 中国地质大学, 2005.