

基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性分析^①

胡斌^{1,2}, 李剑飞^{1,2}, 李京^{1,2}, 张真^{1,2}, 陈怡昕^{1,2}

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北武汉 430081)

摘要: 通过软弱夹层剪切蠕变试验, 探究软弱夹层蠕变特性对边坡稳定性的影响, 根据 Cvisc 蠕变本构模型拟合试验曲线, 并采用有限差分数值计算方法对含软弱夹层边坡进行蠕变计算, 分析了边坡长期位移和剪应变增量的变化。结果表明, 软弱夹层具有典型的蠕变特性; 采用 Cvisc 模型进行数值计算得到的结果较符合实际监测数据; 软弱夹层的蠕变特性不仅使位移量值增加, 也使边坡整体位移分布形式和方向发生显著变化, 且坡顶和坡中位移值较大; 坡体剪应变增量经历了出现、扩展到趋于稳定的过程。

关键词: 边坡稳定性; 边坡工程; 软弱夹层; 蠕变特性; Cvisc 模型; 长期稳定性; 数值分析

中图分类号: TD854

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.002

文章编号: 0253-6099(2023)04-0006-06

Analysis of Long-Term Slope Stability Based on Creep Characteristics of Its Weak Intercalation

HU Bin^{1,2}, LI Jianfei^{1,2}, LI Jing^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, CHEN Yixin^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: A shear creep test was performed for weak intercalation in order to investigate influence of creep characteristics of weak intercalation on slope stability. The obtained curve from the test was fitted according to Cvisc creep constitutive model, and the creep of slope with weak intercalation was calculated by using finite difference method to analyze the variation in long-term displacement and shear strain increment of the slope. The results show that the weak intercalation has typical creep characteristics. The results obtained from the numerical calculation with Cvisc model are basically consistent with the actual monitoring data. The creep characteristics of weak intercalation cause not only increase in the displacement, but also significant changes in the distribution form and orientation of the overall displacement of the slope, especially greater displacement at the top and in the middle of the slope. As a result, the slope body experiences an increment in the shear strain, which is then expanded and finally tends to stable.

Key words: slope stability; slope engineering; weak intercalation; creep characteristics; Cvisc model; long-term stability; numerical analysis

我国西南地区存在大规模含缓倾软弱夹层的矿山边坡。软弱夹层强度低、蠕变效应明显, 常发生沿着软弱夹层滑动破坏的现象。因此, 基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性研究对于矿山安全、高效开采具有重要意义^[1]。目前, 众多学者通过开展室内试验, 发现了软弱夹层具有显著的蠕变力学特性, 同时也建

立了一些能够反映其蠕变力学特性的本构模型^[2-6]。若要将试验研究成果应用到实际工程中, 则需根据试验成果选择合适的蠕变本构模型, 对边坡的蠕变效应进行数值模拟, 探讨边坡的时效变形和稳定性^[7-9]。已有研究表明, 含软弱夹层岩质边坡的稳定性明显低于不含软弱夹层的边坡^[10], 采用基于蠕变本构模型的数

① 收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1802243, 41672317); 湖北省技术创新专项(重大项目)(2017ACA184); 武汉科技大学重大科技项目培育类创新团队(A类)(2018TDX01)

作者简介: 胡斌(1974—), 男, 山东曲阜人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为边坡稳定性论证与动态调控研究。

通信作者: 李剑飞(1996—), 女, 新疆伊犁人, 硕士研究生, 主要研究方向为边坡稳定性分析与边坡监测预警。

值计算方法得到的边坡长期稳定性系数明显低于不考虑软弱夹层蠕变特性时的稳定性系数^[11-12]。现有研究成果主要集中在软弱夹层蠕变力学特性的试验研究,包括创建新的蠕变本构模型、对具有蠕变特点边坡整体的变形和应力场变化规律以及含软弱夹层边坡长期稳定性系数等的研究。但是,在软弱夹层蠕变特性对边坡长期位移变化特征以及剪应变增量规律的影响方面尚缺乏系统的研究。

本文开展了软弱夹层的剪切蠕变试验,分析其蠕变特征,确定能反映软弱夹层蠕变特性的本构模型并进行蠕变参数识别,采用有限差分数值计算方法模拟含软弱夹层边坡的长期稳定性,分析其变形特征,并与弹塑性计算得到的结果进行对比。研究含软弱夹层边坡的长期变形特征,可为此类边坡长期稳定性分析和滑坡防治提供参考。

1 工程概况

某石灰石矿山(见图 1)总体为南西高、北东低的山区地貌,属顺向坡地形。节理走向主要集中在 NW-SE、NE-SW。矿区主要开采地层为二叠系下统栖霞组(P_{1q})和茅口组(P_{1m})灰岩。根据勘察报告,茅口组(P_{1m})地层中的 P_{1⁵} 和 P_{1⁶} 层是目前主要出露开采的灰岩地层,且 P_{1⁵} 和 P_{1⁶} 层间夹灰黑色、灰褐色薄层状炭质泥页岩夹层,主要矿物成分为伊利石、方解石和石英。

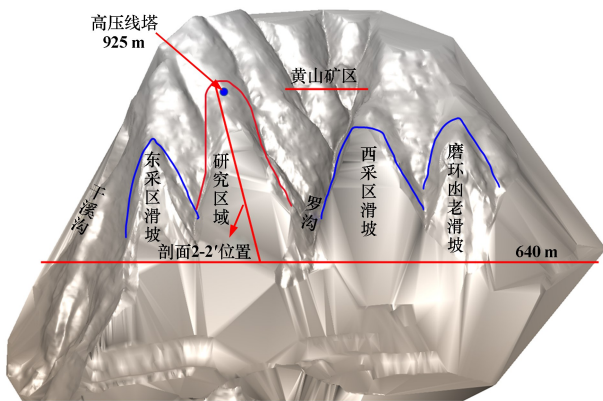


图 1 黄山石灰石矿区三维地形图

通常来说,软弱夹层呈层状夹杂在岩层之间,厚度较小,强度和弹性模量都低于周围岩体,它能引起边坡滑动变形,对矿山边坡稳定性起着控制作用。研究区存在炭质泥页岩软弱夹层,矿山在开采生命周期内受各种外界因素的扰动,软弱夹层力学参数逐渐降低,边坡蠕变变形规律、长期稳定性也发生了变化。

为研究含软弱夹层矿山边坡的长期稳定性,在研究区内选取剖面 2-2' 为研究对象,其工程地质情况如图 2 所示。

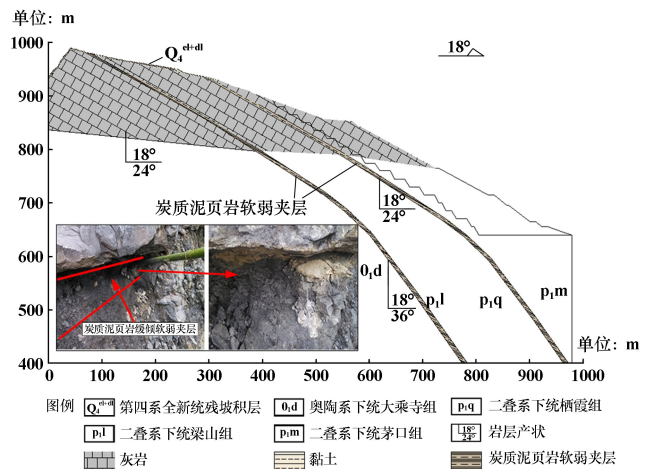


图 2 剖面 2-2' 工程地质图

2 软弱夹层蠕变特性

2.1 剪切蠕变试验方案

从研究区矿山的二叠系炭质泥页岩软弱夹层取样,加工成 75 mm × 75 mm × 150 mm 试样。在蠕变试验之前,根据法向应力为 0.6 MPa 时的直剪试验,确定剪切蠕变分级加载应力水平,共分为六级荷载,分级为 0.62 MPa、1.24 MPa、1.86 MPa、2.48 MPa、3.10 MPa、3.72 MPa。试验过程中,以 100 N/s 的速率施加剪切荷载,每一级剪应力加载时间为 24 h,分级加载至试样破坏为止,剪切蠕变试验整个过程历时 123 h。

2.2 试验结果分析

软弱夹层分级加载剪切蠕变试验结果如图 3 所示。

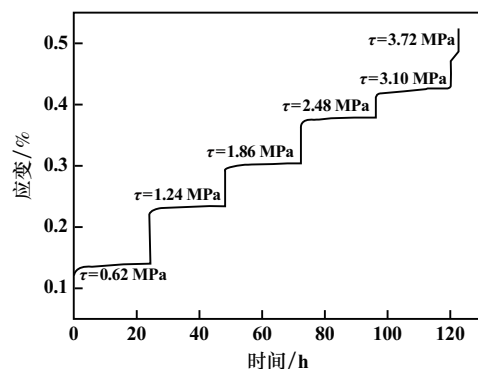


图 3 软弱夹层剪切蠕变试验曲线

由图 3 可知,蠕变变形曲线有如下特征:

1) 加载瞬间,产生了较大的瞬时应变,表明试样具有瞬时变形特征,对于前五级剪应力水平,瞬时变形

是总变形的主要部分。

2) 试验过程中,没有明显的蠕变应力门槛值,试样的变形在低应力水平下也随时间增加而增大,但增加幅度较小。

3) 低应力水平下,试样只表现出衰减蠕变和稳态蠕变特征,瞬时变形产生后,随着蠕变速率下降,蠕变从衰减蠕变转变为稳态蠕变,在一定时间后变形逐渐收敛到一个恒定值。

4) 最后一级剪应力作用时,随着时间增加,在短暂地出现前两个蠕变阶段后,试样迅速进入加速蠕变阶段,呈现完整的三阶段蠕变曲线,最终发生加速蠕变破坏。

由上述蠕变曲线特征可知,在剪应力作用下,软弱夹层试样呈现出明显的蠕变特性。在应力加载的瞬间应变出现突变,并迅速衰减趋于稳定状态,是因为试样内存在原生初始裂隙,裂隙闭合产生了瞬时弹塑性应变。较高应力水平下,软弱夹层试样出现了加速蠕变现象,这表明软弱夹层存在长期强度,当应力水平超过长期强度时,试样会出现加速蠕变阶段,最终发生黏塑性破坏。

2.3 蠕变模型及参数识别

由图3可知,软弱夹层在施加剪应力的瞬间具有明显的瞬时变形,随着时间增加,软弱夹层表现出衰减蠕变和稳态蠕变,表明软弱夹层同时具有黏性和黏弹性,软弱夹层在高应力下还表现出加速蠕变现象。因此,通过蠕变本构模型辨识,选用 C_{visc} 蠕变模型来描述软弱夹层的蠕变特性,一维应力状态下的模型如图4所示。

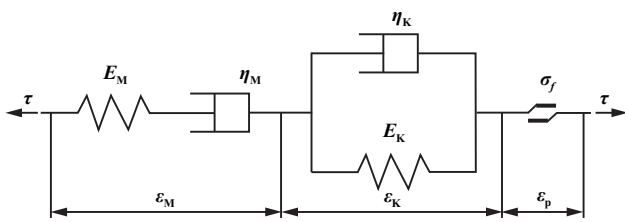


图4 C_{visc} 蠕变本构模型示意

C_{visc} 蠕变模型的蠕变方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M} \right) t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) + \varepsilon_p \quad (1)$$

式中 η_K , E_K , η_M , E_M 分别为 Kelvin 体和 Maxwell 体黏性系数和弹性模量; ε_p 为塑性应变。

基于 C_{visc} 蠕变模型,利用 Origin 软件进行蠕变参数辨识,得到蠕变参数拟合结果如表1所示, C_{visc} 蠕变模型拟合结果与试验结果对比情况见图5。 C_{visc}

元件模型对前五级剪应力下的蠕变曲线拟合度 R^2 都大于 0.97,可知 C_{visc} 蠕变模型能够准确地描述试样低应力蠕变行为,反映出软弱夹层的整体蠕变力学性能,但加速蠕变阶段的拟合效果并不理想,不能反映加速蠕变的过程及趋势。研究区边坡处于低应力环境,可采用 C_{visc} 蠕变模型分析含软弱夹层边坡的长期稳定性。

表1 不同应力水平下蠕变参数拟合结果

剪应力等级	E_M / GPa	E_K / GPa	η_M / (GPa·d)	η_K / (GPa·d)	R^2
第1级(0.62 MPa)	140.05	4.918	9.66	0.201	0.987 9
第2级(1.24 MPa)	43.25	9.57	26.52	0.438	0.972 57
第3级(1.86 MPa)	140.96	18.42	24.44	0.611	0.984 05
第4级(2.48 MPa)	145.27	20.54	39.36	0.973	0.986 45
第5级(3.10 MPa)	150.38	38.15	31.60	0.432	0.981 15

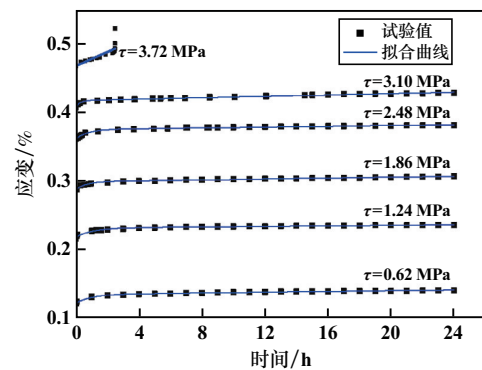


图5 C_{visc} 蠕变模型结果与试验结果对比

3 数值计算模型及参数

基于 C_{visc} 蠕变模型能较好地反映软弱夹层的蠕变力学性质,以黄山石灰石矿山 2-2' 剖面为例,在 ANSYS 中对其划分网格,导入到 FLAC^{3D} 中进行数值计算,分析此矿山边坡长期稳定性。

3.1 数值计算网格模型

对 2-2' 剖面进行适当简化,建立了如图6所示的边坡模型图。计算时的正方向为 x 轴向右和 z 轴向上, x 轴范围为 0~979 m, z 轴计算范围从 400 m 高程到坡面。进行网格划分,得到 25 445 个单元和 31 314 节点,对软弱夹层区域以及边坡脚附近岩体单元进行加密。模型底面为全约束,两侧进行法向约束,坡面自由。为了监测数值计算过程中边坡位移的变化,在坡面上设置了 3 个监测点 JC1、JC2 和 JC3。边坡岩体初始应力场仅考虑自重的影响。

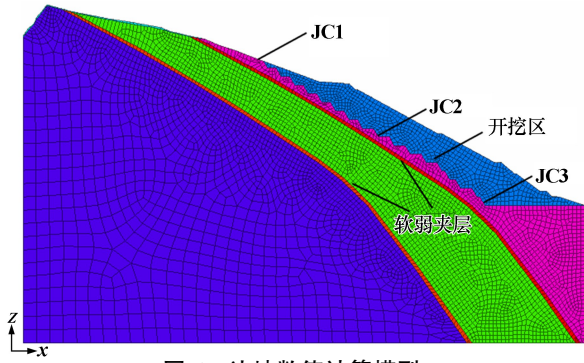


图 6 边坡数值计算模型

3.2 计算本构模型与参数

为模拟边坡岩体的开挖卸荷及其长期蠕变过程,利用 FLAC^{3D} 对边坡进行数值计算分析,软弱夹层采用 Cvisc 蠕变本构模型,其他岩层采用 Mohr-Coulomb 模型计算,根据工勘报告、岩石力学试验结果以及监测数据反演,得到岩体弹塑性参数取值如表 2 所示,Cvisc 黏弹塑性蠕变模型力学参数如表 3 所示。

表 2 岩体物理力学参数

岩层名称	弹性模量 E/GPa	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	泊松比 μ	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
覆盖土	0.05	1 280	0.35	0.017	18
石灰岩	7	2 680	0.24	1.71	37
软弱夹层	1.0	1 920	0.28	0.30	29

表 3 软弱夹层蠕变力学参数

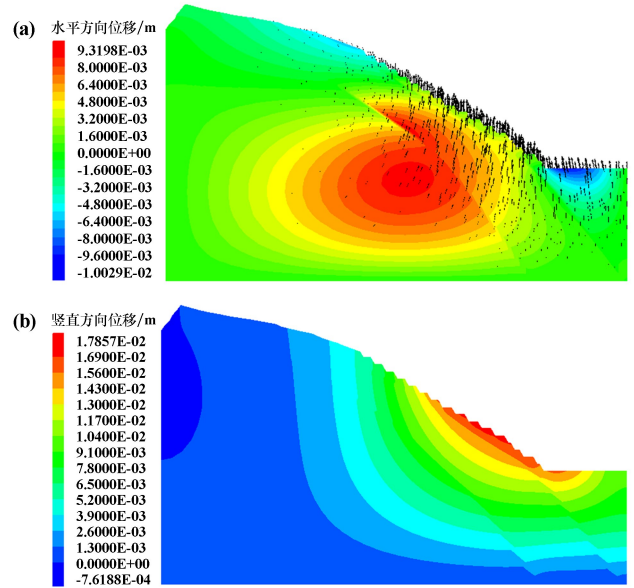
E_M/GPa	E_K/GPa	$\eta_M/(GPa \cdot d)$	$\eta_K/(GPa \cdot d)$
168	3	20.6	0.5

4 计算结果分析

4.1 边坡弹塑性开挖分析

弹塑性计算条件下,开挖后边坡坡体变形等值云图如图 7 所示。从图 7 可以看出,开挖后的边坡水平位移最大值位于坡底平台处,坡体内在软弱夹层附近位移呈椭圆形向周围扩展,总体上边坡水平方向变形不大;竖直方向位移基本为正值,变形较为明显,边坡坡面的中下部变形较大,最大变形量为 17.9 mm;随着深度增加,竖向卸荷回弹变形量逐渐减小,到剖面底部,变形量减小到零,表明开挖对附近的岩体影响较大。

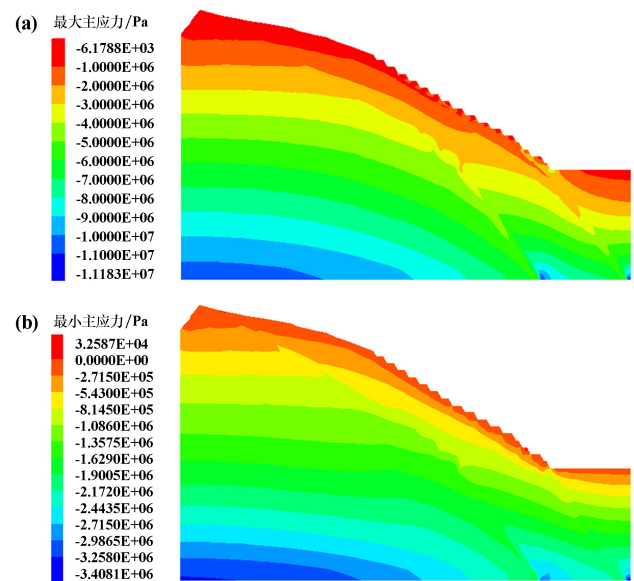
由水平方向位移和竖直方向的位移计算结果可知,开挖之后立即产生的竖直方向变形量较大,水平位移量较小。由位移矢量可知,边坡整体位移竖直向上向临空面发生变形,从坡体内部到边坡表面位移矢量逐渐变大。



(a) 水平方向; (b) 竖直方向

图 7 开挖后位移云图和位移矢量图

在开挖后瞬间,数值计算得到的边坡最大主应力和最小主应力分布如图 8 所示。边坡岩体最大主应力在竖直方向基本呈现较均匀的带状分布,在软弱夹层与模型边界的相交处有局部应力集中现象,最大主应力均为压应力,最大值为 6.18 kPa,位于坡体浅表层;最小主应力分布规律与最大主应力相似,呈层状分布且竖直向坡体深部逐渐增大,除边坡表面外,最小主应力为压应力,坡体浅表层的主应力为 32.59 kPa(拉应力)。受软弱夹层的影响,应力等值线在软弱夹层产生不连续现象,但从总体来看,弹塑性计算下软弱夹层的存在对应力分布规律影响较小。



(a) 最大主应力; (b) 最小主应力

图 8 开挖后最大主应力和最小主应力分布图

4.2 数值计算与现场监测数据对比分析

选取边坡坡顶处监测点 JC1 为关键点,在蠕变数值计算过程中监测该点位移的变化,以现场监测的总位移为基础,与边坡蠕变计算结果对比,JC1 位移变化规律如图 9 所示。通过对比分析现场监测曲线和蠕变变形曲线可知,监测点位移曲线与实际监测数据存在差异,但总体变化趋势基本一致,表明所选用的 Cvisc 模型能较好地反映边坡的蠕变变形规律。

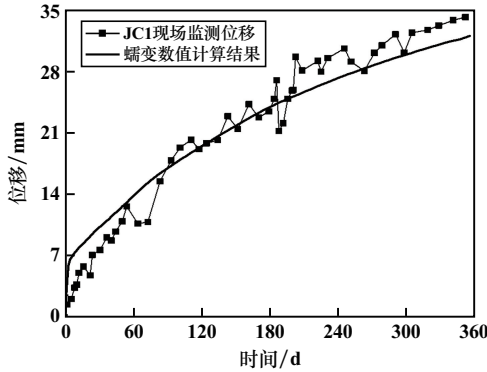


图9 JC1 现场监测位移与蠕变数值计算结果

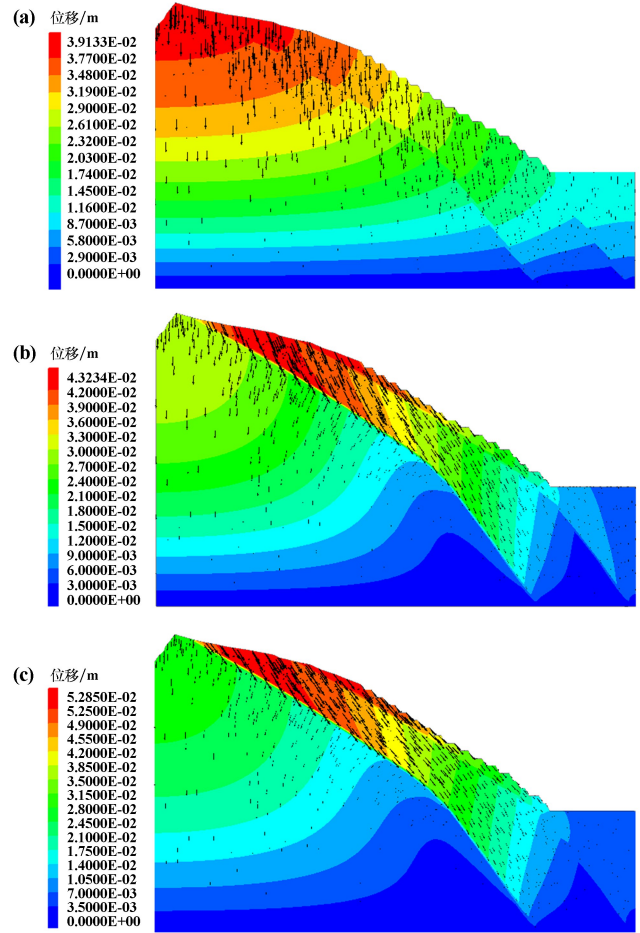
4.3 边坡长期变形特征

对开挖后的边坡进行数值计算,得到弹塑性和蠕变 1 年和 3 年条件下的位移云图如图 10 所示。可见软弱夹层的蠕变特性对边坡变形有显著影响。对于边坡岩体的整体变形规律而言,与弹塑性计算相比,蠕变 1 年边坡位移的分布规律发生了明显变化,位移最大区域由整个边坡顶部转移到了软弱夹层右边区域,蠕变位移最大值为 43.3 mm,增加了 9.5%,位移方向也不再是竖直向下。蠕变 1 年与蠕变 3 年相比,位移分布规律变化不明显,但位移值明显增大,且位移方向逐渐变为与软弱夹层方向平行且向下,对边坡的变形和稳定性更为不利。可知,随着时间推移及开挖扰动,边坡沿坡脚存在剪出倾向,必须合理布置开挖方案,同时加强边坡监测。

边坡坡顶、坡中和坡底处揭示的变形规律如表 4 所示。随着时间增加,坡顶和坡中位移量显著增加,坡脚位移变化较小;蠕变计算从 1 年到 2 年,位移值急剧增加,2 年到 3 年时,位移增幅逐渐减小。分析可知,蠕变 3 年之后,边坡变形逐渐趋于稳定。

从上述数值计算得到的边坡变形特征可以看出,与弹塑性计算相比,软弱夹层的蠕变特性不仅增加了位移量值,而且还显著改变了边坡整体的位移分布形式和方向;随着时间增加,边坡变形逐渐趋于稳定;从不同关键点的变化规律可知,边坡蠕变位移变化在中上部表现得更加突出,对边坡长期稳定性影响更大,应

重点关注和监测。



(a) 瞬时弹性; (b) 蠕变 1 年; (c) 蠕变 3 年

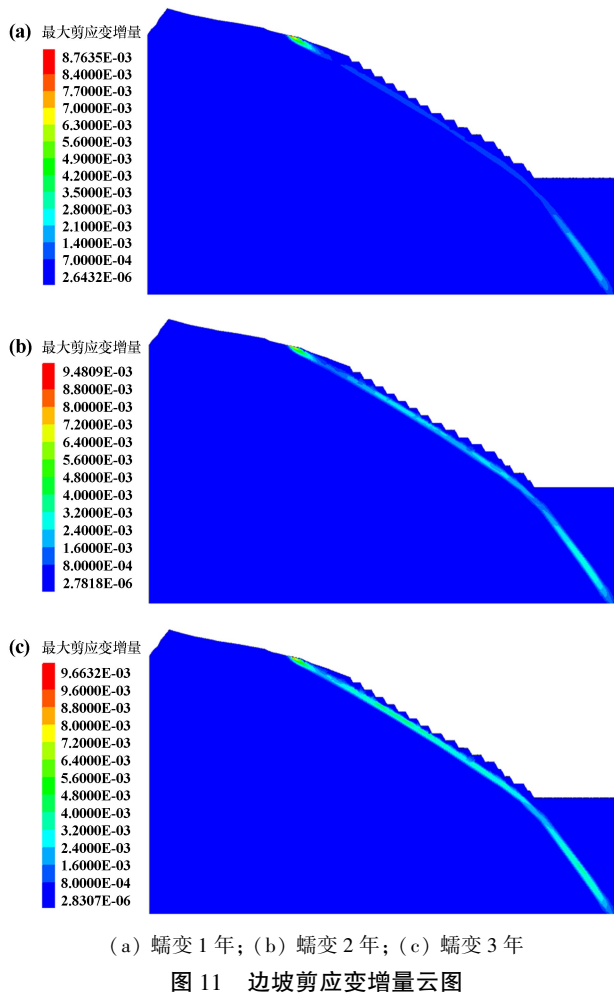
图 10 边坡合位移云图和位移矢量图

表 4 不同关键点位移变化对比

关键点位置	位移/mm		
	蠕变 1 年	蠕变 2 年	蠕变 3 年
坡顶(JC1)	31.99	41.85	43.61
坡中(JC2)	22.25	27.70	29.49
坡脚(JC3)	8.04	8.93	9.11

4.4 边坡剪应变增量规律分析

为了更加直观地表现边坡岩体随着时间增加的渐进性变形破坏,通过蠕变数值计算,得到了剪应变增量云图,如图 11 所示。由图 11 可知,剪应变增量经历了出现、扩展和稳定阶段。蠕变 1 年时,剪应变增量发生在软弱夹层上,且在坡底和坡顶处最为明显;蠕变 1 年到 2 年时,最大剪应变增量沿着软弱夹层不断向边坡内部扩展,且最大剪应变增量有所增加,但蠕变 2 年时并未形成贯通区,边坡稳定性较好。蠕变 2 年到 3 年时,剪应变增量增加趋势变缓,表明随着时间增长,坡体剪应变增量逐渐扩展且最终趋于稳定。剪应变增量最终未形成贯通区域,表明此时边坡是稳定的。



5 结 论

1) 剪切蠕变试验结果表明,软弱夹层具有显著的三阶段蠕变特性, C_{visc} 蠕变模型能较好地描述低应力下软弱夹层蠕变试验曲线特征。

2) 在弹塑性开挖条件下,边坡垂直方向位移大于水平位移,整体变形表现为竖直向上向临空面的趋势。最大主应力和最小主应力分布规律相同,沿竖向呈层状分布且随深度增加逐渐增大。

3) 蠕变计算结果与实际监测数据较吻合;蠕变计

算条件下,边坡位移值增大,位移分布形式和方向发生明显变化,位移方向逐渐转向沿软弱夹层朝临空面发生变形,对边坡变形和稳定性更为不利;经过一段时间蠕变变形后,边坡变形逐渐趋于稳定;在蠕变变形过程中,边坡坡体中上部位移变化较大,坡底位移较小。

4) 蠕变数值计算过程中,剪应变增量分布的变化可以体现坡体的渐进性破坏过程,剪应变增量经历了从出现、扩展到趋于稳定的过程,剪应变增量最终未形成贯通区域,表明此时边坡是稳定的。

参考文献:

- [1] 马 冲. 含水软弱夹层非线性流变机理及其工程应用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉)工程学院, 2017.
- [2] 朱赛楠,殷跃平,李 滨. 二叠系炭质页岩软弱夹层剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2019,40(4):1377-1386.
- [3] 张泽林,王 涛,吴树仁,等. 泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(4):713-724.
- [4] 曾华凯,陈建宏,杨 珊. 某矿区岩石蠕变力学特性研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(4):11-13.
- [5] 陈兴周,李建林,柴军瑞,等. 坝肩高边坡层间错动带剪切蠕变特性与模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013,35(9):1675-1682.
- [6] 韩 钢,侯 靖,周 辉,等. 层间错动带剪切蠕变试验及蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(5):958-971.
- [7] 方庆红,胡 斌,盛建龙,等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶面角协同优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):5-9.
- [8] 张公平,周 钟,姜清辉,等. 500 m 级超高边坡时效变形特征及长期稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017,13(6):1688-1694.
- [9] 蒋昱州,徐卫亚,王瑞红,等. 拱坝坝肩岩石流变力学特性试验研究及其长期稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(S2):3699-3709.
- [10] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020,28(3):626-638.
- [11] 尤耿明,王光进,刘文连,等. 矿山边坡软弱夹层赋存状态及蠕变特性对边坡稳定性影响研究[J]. 金属矿山, 2021(12):200-206.
- [12] 刘新喜,侯 勇,戴 毅,等. 软弱夹层岩质边坡长期稳定性研究[J]. 中外公路, 2017,37(4):21-24.

引用本文: 胡 斌,李剑飞,李 京,等. 基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):6-11.