

硅质板岩剪切蠕变特性及边坡变形机理研究

李剑^{1,2}, 颜良宇³, 於开炳^{1,2}, 黎明^{1,2}, 颜廷舟^{1,2}, 赵嘉³

(1.湖北省交通规划设计院股份有限公司,湖北武汉 430051;2.公路地质灾害信息化与智能防控湖北省工程研究中心,湖北武汉 430051;3.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074)

摘要:为研究硅质板岩的时效蠕变效应和高边坡变形破坏演化规律,该文采用室内岩体剪切蠕变试验,通过绘制不同法向应力下硅质板岩的剪切蠕变历时曲线、剪切位移-时间曲线和不同法向荷载及剪切荷载下蠕变速率-时间曲线,研究了硅质板岩平均蠕变速率与剪切荷载变化规律,并采用稳态蠕变速率法确定了硅质板岩长期抗剪强度参数。研究表明:蠕变试验中,黏聚力敏感度高于内摩擦角;以十堰至巫溪高速公路ZK33+450硅质板岩高边坡为例,基于摩尔-库仑模型采用有限差分法对该典型硅质板岩高边坡剪切蠕变条件下的变形破坏机制进行了研究分析。

关键词:边坡工程;硅质板岩;剪切蠕变试验;稳态蠕变速率法;长期抗剪强度;有限差分法

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Shear Creep Characteristics and Slope Deformation Mechanism of Siliceous Slate

LI Jian^{1,2}, YAN Liangyu³, YU Kaibing^{1,2}, LI Ming^{1,2}, YAN Tingzhou^{1,2}, ZHAO Jia³

(1.Hubei Communications Planning and Design Institute Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430051, China; 2.Hubei Provincial Engineering Research Center for Highway Geological Hazard Informatization and Intelligent Prevention and Control, Wuhan, Hubei 430051, China; 3.Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: To study the time-dependent creep effect of siliceous slate and the deformation and failure evolution law of high slope, in this paper, the shear creep test of indoor rock mass was carried out to plot the shear creep duration curves of siliceous slate under different normal stresses, the shear displacement-time curve, and the creep rate-time curve under different normal loads and shear loads. The average creep rate and shear load variation of siliceous slate were studied, and the long-term shear strength parameters of siliceous slate were determined by the steady-state creep rate method. The results show that in the creep test, the sensitivity of cohesion is significantly greater than that of internal friction angle. Finally, the high slope of ZK33 + 450 siliceous slate on the Shiyan-Wuxi Expressway is used. Based on the Mohr-Coulomb model, the finite difference method was used to analyze the deformation and failure mechanism of the high slope of the typical siliceous slate under shear creep conditions.

Keywords: slope engineering; siliceous slate; shear creep test; steady-state creep rate method; long-term shear strength; finite difference method

0 引言

蠕变是指岩石在恒定荷载作用下,变形随时间逐渐增大的性质。在上覆岩体自重应力的作用下,岩体变形及应力状态将随时间不断推移而变化,边

坡重力作用逐渐加强,边坡将沿软弱层面发生加速蠕变,当层面所受剪应力大于其长期抗剪强度时,边坡表层松散破碎岩体将沿坡体内部软弱层面发生大规模滑塌^[1-2]。

公路工程高边坡失稳破坏大都是由其组成岩体

收稿日期:2024-06-26(修改稿)

基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(编号:2020-186-1-11)

作者简介:李剑,男,硕士,高级工程师.E-mail:53130427@qq.com

的时效蠕变效应造成^[3-4],本文以十堰至巫溪高速公路 ZK33+450 硅质板岩高边坡为例,通过开展室内岩体剪切蠕变试验,绘制不同法向应力下硅质板岩的剪切蠕变历时曲线、剪切位移-时间曲线和不同法向荷载及剪切荷载下蠕变速率-时间曲线,研究硅质板岩平均蠕变速率与剪切荷载变化规律,并采用稳态蠕变速率法确定了硅质板岩长期抗剪强度参数,最后基于摩尔-库仑模型,采用有限差分法对该典型硅质板岩高边坡在剪切蠕变条件下的变形破坏机制进行分析。研究成果可为该边坡支挡工程设计提供可靠物理力学参数,也可为类似工程地质条件下高边坡设计施工提供借鉴。

1 岩体结构面直接剪切试验

采用长江科学院 CYL 岩石剪切流变仪进行岩体结构面直接剪切试验。岩体试样取自十堰至巫溪高速公路 ZK33+450 段 XQZK53 钻孔岩芯,结构面填充膨润土、砂岩岩屑等模拟天然岩体结构面填充物。先对制备试样进行直接剪切试验,获得不同法向荷载下试样抗剪强度,再绘制试样剪应力-剪切位移关系曲线如图 1 所示。

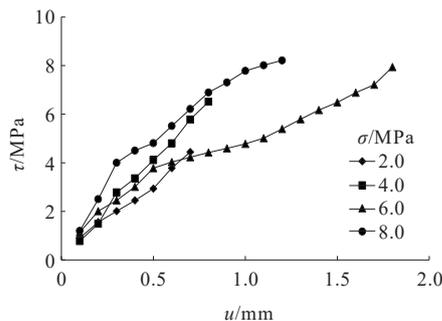


图 1 硅质板岩剪应力-剪切位移关系曲线

Figure 1 Relationship between shear stress and shear displacement of siliceous slate

由图 1 可知:硅质板岩在一定法向荷载作用下,发生剪切破坏时产生的切向变形相当小,基本为 0.6~1.8 mm。从不同法向荷载下岩石破坏时产生的剪切位移可以看出,随着法向荷载的增大,试样破坏时的剪切位移逐渐增大,试样法向荷载与抗剪强度符合 Mohr-Coulomb 强度准则^[5]。根据硅质板岩剪应力-剪切位移曲线,可得到不同法向荷载作用下硅质板岩抗剪强度,将试样所受法向荷载与其相对应的抗剪强度作散点图,并对两者进行线性回归。结果

见图 2。

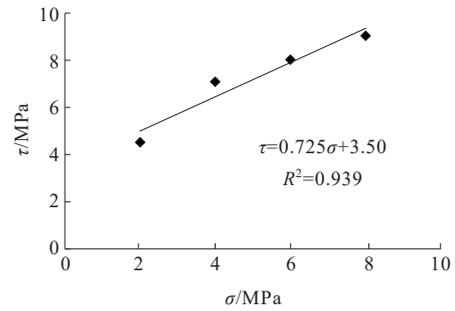


图 2 硅质板岩抗剪强度与法向应力关系图

Figure 2 Relationship between shear strength and normal stress of siliceous slate

由图 2 可知:硅质板岩抗剪强度与法向应力呈较好的线性关系,拟合度为 0.939。根据拟合公式: $\tau = 0.725\sigma + 3.50$,得到硅质板岩在直接剪切条件下的黏聚力 $c = 3.50$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 35.9^\circ$ 。

2 岩体结构面剪切蠕变试验

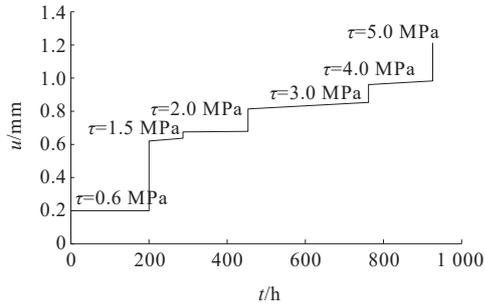
硅质板岩剪切蠕变试验同样是在 CYL 系列岩石剪切流变仪试验系统进行,根据硅质板岩直接剪切试验结果,确定蠕变试样水平剪应力加载级数^[6],分别为 2 MPa、4 MPa、6 MPa、8 MPa 共 4 个法向荷载,在不同法向荷载作用下对硅质板岩标准试样开展室内剪切蠕变试验。

2.1 硅质板岩蠕变历时曲线分析

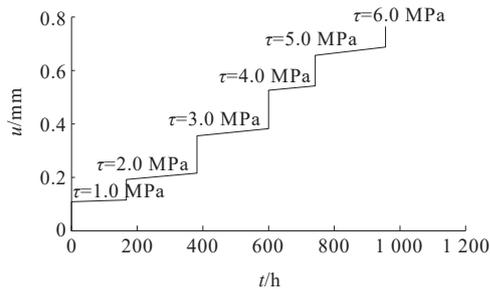
根据硅质板岩剪切蠕变数据,绘制了不同法向应力下硅质板岩剪切蠕变历时曲线^[7],如图 3 所示。

从图 3 可以看出:硅质板岩的剪切蠕变特性与其所受法向荷载及剪应力的大小密切相关^[8]。恒定法向荷载作用下,试样剪切位移随剪应力的增大逐渐增大;不同法向荷载作用下,正应力越大,试样沿预定剪切层面达到某一相同蠕变变形量所需的剪应力越大。各级水平剪切荷载作用下,试样变形以瞬时弹性变形为主,其瞬时变形量远大于蠕变变形量,且瞬时变形随剪应力的增大明显增大。

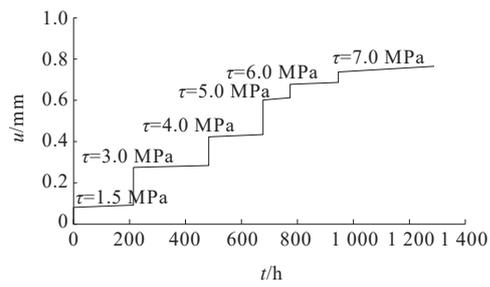
当施加各级剪切荷载时,岩石经历短暂的瞬时变形阶段和初始蠕变阶段后,迅速进入稳定蠕变阶段^[9],在稳定蠕变阶段,剪切位移随时间近似线性增长,此阶段累积变形量较小,试样最终剪切变形位移随时间延长而逐渐增大,并最终趋于稳定状态。



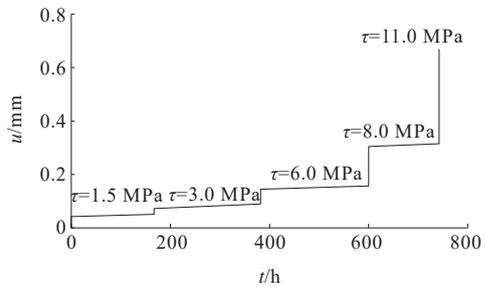
(a) $\sigma=2$ MPa



(b) $\sigma=4$ MPa



(c) $\sigma=6$ MPa



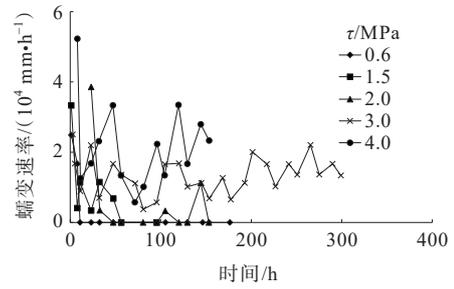
(d) $\sigma=8$ MPa

图3 不同法向应力下硅质板岩剪切蠕变历时曲线

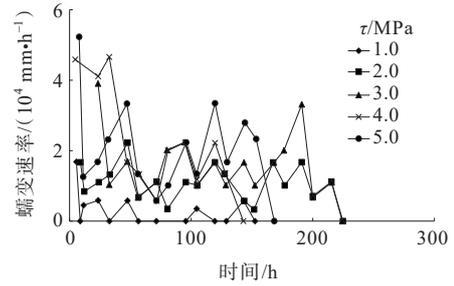
Figure 3 Shear creep duration curves of siliceous slate under different normal stresses

2.2 剪切蠕变速率特性研究

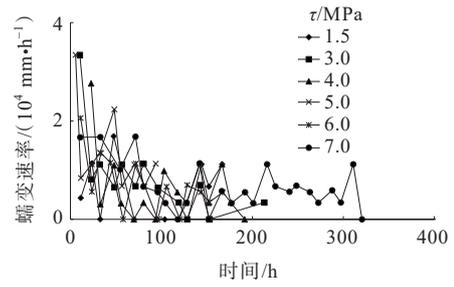
为研究法向荷载与剪切荷载对硅质板岩蠕变速率变化规律的影响,利用硅质板岩剪切蠕变试验原始数据及蠕变曲线各时刻的斜率,得到不同法向荷载及水平剪切荷载作用下,硅质板岩水平向蠕变速率-时间变化曲线^[10],如图4所示。



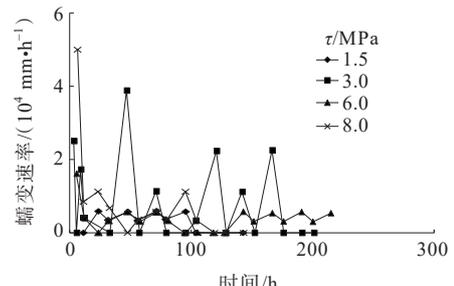
(a) $\sigma=2$ MPa



(b) $\sigma=4$ MPa



(c) $\sigma=6$ MPa



(d) $\sigma=8$ MPa

图4 不同法向荷载及剪切荷载下蠕变速率-时间图

Figure 4 Creep rate-time plots under different normal and shear loads

图4表明:不同法向荷载及各级剪切荷载作用下,试样变形量相差不大,致使硅质板岩蠕变速率变化幅度较小,在蠕变速率-时间图中,出现大量散点重叠^[11]。在较低剪应力水平作用下,试样仅出现初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段。施加剪切荷载的瞬间蠕变速率最大,随后急剧降低,蠕变速率降幅较大,

该阶段历时较短,基本为 5~10 h,蠕变速率最终衰减为零;稳定蠕变阶段为试样蠕变曲线主要部分,该阶段历时较长,大都持续 150 h 左右,稳定蠕变阶段开始时蠕变速率最大,且随着时间的延长,蠕变速率不断减小,最后保持为大于零的恒定值^[12]。

硅质板岩平均蠕变速率与剪切荷载关系如图 5 所示。

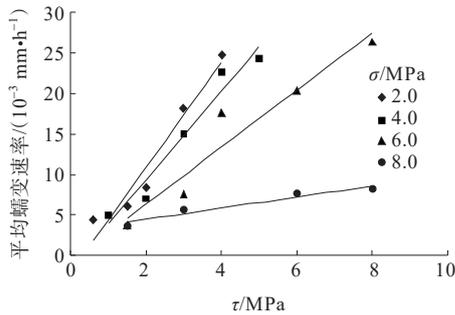


图 5 硅质板岩平均蠕变速率与剪切荷载关系图

Figure 5 Relationship between average creep rate and shear load of siliceous slate

由图 5 可知:法向荷载一定时,硅质板岩平均蠕变速率随剪切荷载的增加呈线性增大^[13];同一剪切荷载条件下,法向荷载越大,平均蠕变速率越小。各级剪切荷载作用下,硅质板岩平均蠕变速率与剪切荷载呈较好的线性关系。

2.3 长期抗剪强度的确定

在稳定蠕变阶段,岩石的变形行为具有多样性。一方面岩石变形可能逐渐趋于收敛;另一方面,岩石有可能从稳定蠕变阶段进入加速蠕变阶段而发生脆性破坏。通常称这一蠕变的阈值应力为岩石的长期抗剪强度,本文根据不同法向应力下的稳定蠕变速率和剪切荷载的函数关系研究硅质板岩长期强度^[14]。

图 6 为硅质板岩稳定蠕变速率与剪切荷载关系曲线。

由图 6 可知:不同法向应力作用下,硅质板岩的稳定蠕变速率均随水平剪切荷载的增加呈上凹形指数曲线,其拟合度处于 0.955 2~0.972 2。当稳定蠕变速率出现明显陡增段时,则可取陡增段起点剪切荷载作为长期抗剪强度值^[15],根据图 6 拟合曲线,获得不同法向应力(2.0 MPa、4.0 MPa、6.0 MPa、8.0 MPa)条件下硅质板岩长期强度分别为 2.56 MPa、3.57 MPa、5.58 MPa、6.65 MPa。

利用 Mohr-Coulom 强度准则,对硅质板岩长期

抗剪强度与其相应法向荷载进行线性回归^[16],得到硅质板岩长期抗剪强度与法向荷载关系如图 7 所示。

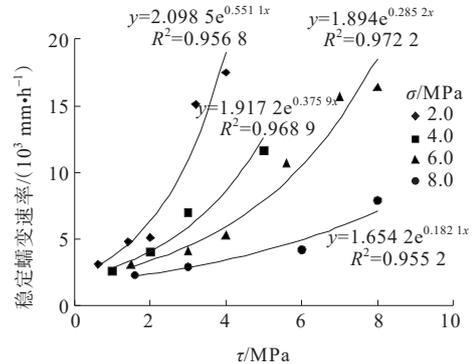


图 6 硅质板岩稳定蠕变速率与剪切荷载关系曲线

Figure 6 Relationship between stable creep rate and shear load of siliceous slate

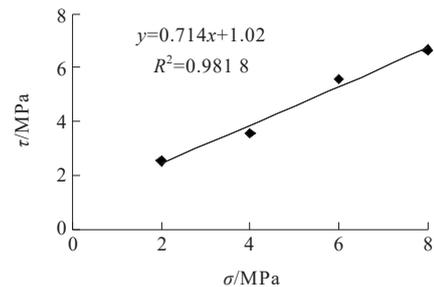


图 7 硅质板岩长期抗剪强度与法向应力关系图

Figure 7 Relationship between long-term shear strength and normal stress of siliceous slate

由图 7 可知:采用稳态蠕变速率法得到的硅质板岩长期强度与法向荷载线性相关较好,其拟合度为 0.981 8,根据长期抗剪强度拟合公式: $\tau = 0.714\sigma + 1.02$,得到硅质板岩黏聚力 $c = 1.02$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 35.5^\circ$ 。对比直接剪切条件下强度参数,在剪切蠕变条件下,硅质板岩黏聚力从 3.50 MPa 降低到 1.02 MPa,出现大幅度降低,而内摩擦角从 35.9° 降低到 35.5° ,基本未发生变化,表明:在蠕变试验中,硅质板岩黏聚力对蠕变试验的敏感度远大于内摩擦角。

3 实例分析

十堰至巫溪高速公路 ZK33+450 高边坡位于湖北省竹溪县天宝乡,最大挖深约 52 m。边坡主要由硅质板岩组成,该边坡原设计为 6 级边坡,除第 1 级为挡墙外,第 2~4 级坡率为 1:0.75,第 5、6 级坡率为 1:1.00,边坡的开挖分级进行,根据边坡的原设计,边坡第 1 级为挡墙,第 2 级为框架植物护坡,第 3~5 级

为挂网喷播植物护坡。开挖后边坡坡向NW343°,坡角53°,高边坡实测岩层产状为336°∠40°,边坡坡向与岩层倾向呈顺向,且坡角小于倾角,为典型顺层高边坡,整体稳定性较差。

3.1 边坡模型及计算参数

根据边坡所在区域地形以及结构面的发育情况,建立边坡的稳定性分析模型如图8所示,对边坡的稳定性进行分析。

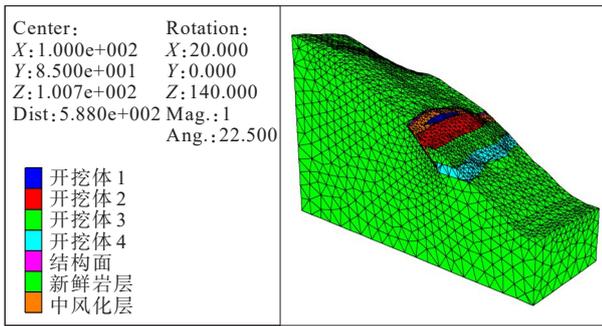


图8 模型网格划分

Figure 8 Model meshing

根据硅质板岩室内试验得到的物理力学参数,结合现场实际情况,考虑岩体内结构面的发育情况,各岩体的基本物理力学参数选取如表1所示。岩层的本构模型采用摩尔-库仑本构^[17]。

表1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock formation

岩层名称	重度/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
岩体	26.0	16	0.18	1 020	35.5
结构面	24.5	2	0.32	18	15.0

模型的边界条件为:地表为自由边界,底部为固定边界,其余各面法向约束^[18],考虑到该边坡开挖卸荷后,初始构造应力得到一定程度的释放,且该边坡为典型顺层高边坡,岩体结构面强度为影响该边坡稳定性的最主要因素,因此忽略该边坡构造应力的影响,初始应力仅考虑其自重应力,自重作用下边坡的大、小主应力分布见图9、10。

3.2 边坡分级开挖矢量位移分析

根据边坡的施工顺序,边坡开挖按4步进行,每开挖一级计算一次,模型计算平衡后进行下一级开挖。

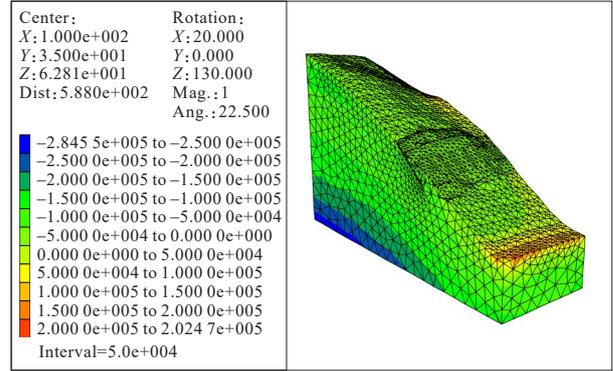


图9 边坡初始小主应力分布图(单位:Pa)

Figure 9 Initial small principal stress distribution of slope (unit:Pa)

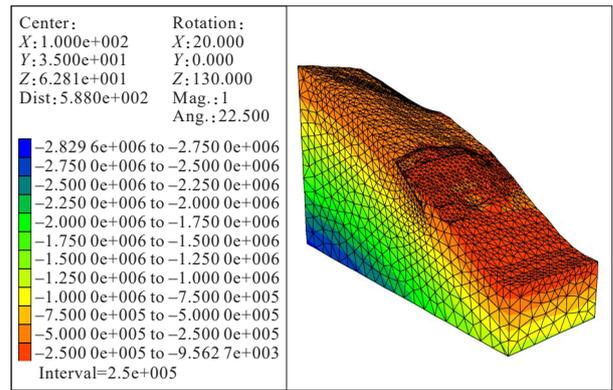


图10 边坡初始大主应力分布图(单位:Pa)

Figure 10 Initial large principal stress distribution of slope (unit:Pa)

图11为边坡从上而下依次进行分级开挖时的位移等值云图。图中显示边坡在进行前3级开挖过程中,应力释放造成开挖区周围岩体发生卸荷变形,影响范围随着开挖范围的增大逐渐增大,并且位移量随着开挖的进行也逐渐累积,最大位移位于坡脚应力集中部位。图11(c)显示边坡在进行前3级开挖后的累积位移最大值为 3.8×10^{-4} m;图11(d)显示边坡在进行第4级开挖后的最大位移值为 3.0×10^{-2} m,并且随着计算的进行边坡的位移量持续增大,与前3级开挖相比,边坡的累积位移量发生突变,说明边坡的稳定性降低,并且随着变形的持续增大,结构面强度的逐步降低,边坡发生失稳^[19]。

3.3 边坡分级开挖塑性区分析

岩体的破坏形式主要分为剪切破坏和拉张破坏,有限差分法以边坡开挖面塑性区的贯通作为边坡失稳的重要标志之一^[20]。边坡开挖后发生失稳后的塑性区分布图见图12。

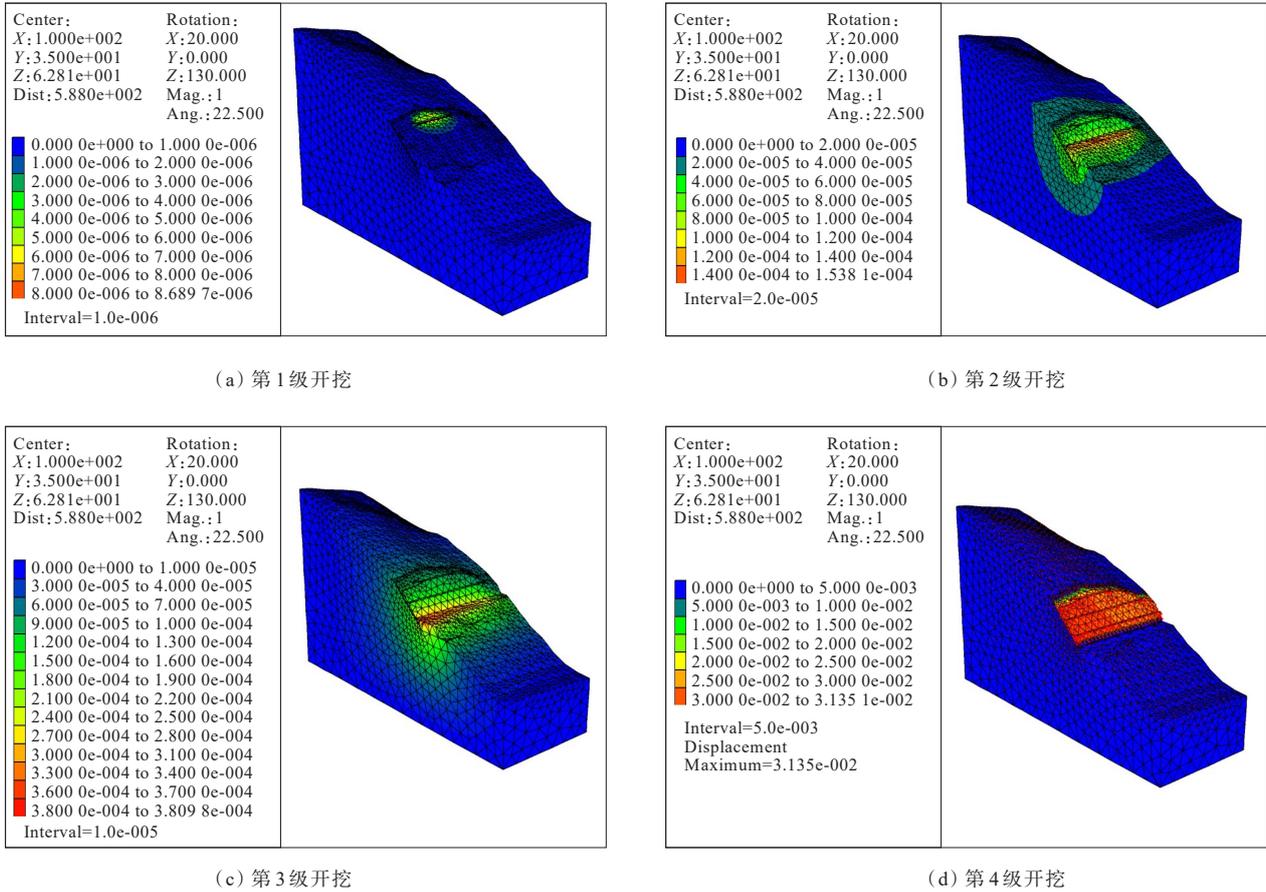


图 11 边坡开挖矢量位移等值云图(单位:m)

Figure 11 Isogram of slope excavation vector displacement (unit:m)

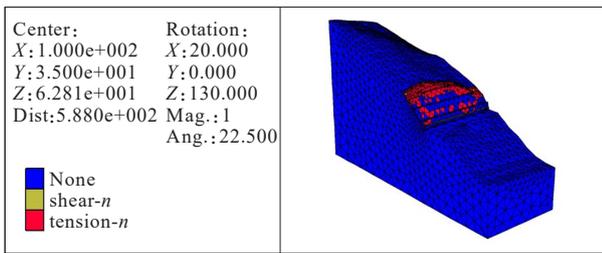


图 12 开挖卸荷后边坡塑性区分布图

Figure 12 Distribution of plastic zone of slope after excavation and unloading

由图 12 可知:边坡完全开挖后,边坡后缘岩土体由于拉应力产生破坏,实际表现为后缘地表出现拉裂缝^[21]。随着结构面强度进一步降低,结构面的强度难以抵抗边坡上部推力,此时边坡处于失稳临界状态。随着结构面塑性区的进一步发展,塑性区贯通,此时边坡发生整体失稳。边坡失稳时,拉应力区主要分布在滑坡体后缘,剪切塑性区主要分布在滑面处,滑坡体前缘的岩体主要受后缘滑体的挤压,产生了鼓胀变形,岩土表层受拉应力作用,导致岩土体

表层发生拉裂破坏,发育纵向的张拉裂缝^[22]。

4 结论

本文通过开展硅质板岩室内岩体剪切蠕变试验,采用稳态蠕变速率法确定硅质板岩长期抗剪强度参数,采用有限差分法对十堰至巫溪高速公路 ZK33+450 段硅质板岩高边坡在剪切蠕变条件下的变形破坏机制进行了研究分析,得出如下结论:

(1) 直接剪切试验下,硅质板岩抗剪强度与法向应力呈较好线性关系,法向应力越大,试样的抗剪强度越高。

(2) 剪切蠕变试验下,试样在水平剪应力作用瞬间产生最大剪切位移,进入初始蠕变阶段后,位移率先增大后减小,直至变形稳定后进入稳定蠕变阶段,硅质板岩长期强度明显小于直接剪切强度,表明硅质板岩强度具有显著时效性。

(3) 对比直接剪切条件下的强度参数,在剪切蠕变条件下,硅质板岩黏聚力出现大幅度降低,而内摩

擦角基本未发生变化,表明在蠕变试验中硅质板岩黏聚力的敏感度远大于内摩擦角。

(4) 边坡在初始开挖阶段,仅发生开挖卸荷变形,其变形量较小,边坡完全开挖后,边坡后缘出现拉应力。边坡后缘岩土体由于拉应力产生破坏,在后缘地表出现拉裂缝。随着结构面强度进一步降低,结构面的强度难以抵抗边坡上部推力,此时边坡处于失稳临界状态,随着结构面塑性区的进一步发展,塑性区贯通,此时边坡发生整体失稳。

参考文献:

References:

- [1] 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.
HAN Gang, HOU Jing, ZHOU Hui, et al. Shear creep experimental study on constitutive model of interlayer shear weakness zones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 958-971.
- [2] 袁思凡,李同录, MUMTAZ, Haider, 等.板裂结构岩体边坡弯折变形机制的非连续变形分析[J/OL].中外公路: 1-14[2024-06-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20231026.1523.006.html>.
YUAN Sifan, LI Tonglu, MUMTAZ, Haider, et al. Discontinuous deformation analysis for progressive toppling of the rock slopes with fractured slab structure[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway: 1-14[2024-06-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20231026.1523.006.html>.
- [3] 李安润,邓辉,王小雪,等.饱水-失水循环条件下红层泥岩蠕变特性及本构模型研究[J].工程地质学报,2021,29(3):843-850.
LI Anrun, DENG Hui, WANG Xiaoxue, et al. Research on creep characteristics and constitutive model of red bed mudstone under saturated-dehydrated cycle[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 843-850.
- [4] 段成刚,方彦林,田叶青,等.含泥化夹层岩质边坡地震响应特征振动台试验及数值模拟[J/OL].中外公路: 1-14 [2024-06-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240422.1932.012.html>.
DUAN Chenggang, FANG Yanlin, TIAN Yeqing, et al. Shaking table test and numerical simulation of seismic response characteristics of rock slope with muddy interlayer[J]. Journal of China & Foreign Highway: 1-14 [2024-06-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240422.1932.012.html>.
- [5] 谭绍富,刘辉,邓小钊,等.广义Hoek-Brown准则参数对岩体强度影响的敏感性分析[J].中外公路,2013,33(2): 228-231.
TAN Shaofu, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Sensitivity analysis of the influence of generalized Hoek-Brown criterion parameters on rock mass strength[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(2): 228-231.
- [6] 李任杰,吉锋,冯文凯,等.隐伏非贯通结构面剪切蠕变特性及本构模型研究[J].岩土工程学报,2019,41(12): 2253-2261.
LI Renjie, JI Feng, FENG Wenkai, et al. Shear creep characteristics and constitutive model of hidden non-persistent joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2253-2261.
- [7] 张峰瑞,姜谔男,杨秀荣,等.冻融循环下花岗岩剪切蠕变试验与模型研究[J].岩土力学,2020,41(2):509-519.
ZHANG Fengrui, JIANG Annan, YANG Xiurong, et al. Experimental and model research on shear creep of granite under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 509-519.
- [8] 张家铭,刘宇航,罗昌宏,等.巴东组紫红色泥岩三轴压缩试验及本构模型研究[J].工程地质学报,2013,21(1): 138-142.
ZHANG Jiaming, LIU Yuhang, LUO Changhong, et al. Triaxial compression test and constitutive model for red mudstone of Badong formation[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 138-142.
- [9] 刘廷.云母片岩剪切蠕变特性试验研究[J].工程勘察, 2020,48(2):13-19.
LIU Ting. Experimental study on shear creep characteristics of mica schist[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(2): 13-19.
- [10] 任永强,张家铭,李晔,等.基于数值模拟技术的爆破动力荷载对边坡的稳定性影响研究[J].自然灾害学报,2013, 22(5):262-268.
REN Yongqiang, ZHANG Jiaming, LI Ye, et al. Study into influence of blasting dynamic load on slope stability based on numerical simulation[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 262-268.
- [11] 张爱花,牛肖.基于极限平衡法的边坡稳定敏感性因素分析[J].中外公路,2021,41(增刊2):55-58.
ZHANG Aihua, NIU Xiao. Sensitivity analysis of slope stability based on limit equilibrium method[J]. Journal of

- China & Foreign Highway,2021,41(sup 2):55-58.
- [12] 李宁,张慧莉,张茂建,等.红层泥岩剪切蠕变特性及非常本构模型研究[J].上海理工大学学报,2023,45(6):626-635.
- LI Ning,ZHANG Huili,ZHANG Maojian,et al.Shear creep properties and its unsteady constitutive model of the red mudstone[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2023,45(6):626-635.
- [13] 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.
- HU Bin,LI Jianfei,LI Jing,et al. Analysis of long-term slope stability based on creep characteristics of its weak intercalation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):6-11.
- [14] 刘昂,张迁,华宇,等.不同粗糙度系数结构面分级剪切蠕变特性[J].南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(2):220-227.
- LIU Ang,ZHANG Qian,HUA Yu,et al.Graded shear creep characteristics of structural planes with different roughness coefficients[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition),2023,45(2):220-227.
- [15] 陈国庆,简大华,陈宇航,等.不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变特性[J].岩土工程学报,2021,43(4):661-669.
- CHEN Guoqing,JIAN Dahua,CHEN Yuhang,et al. Shear creep characteristics of red sandstone after freeze-thaw with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(4):661-669.
- [16] 陈昌富,朱世民,高傑,等.考虑注浆压力影响锚-土界面剪切蠕变Kriging模型[J].岩土工程学报,2019,41(增刊1):125-128.
- CHEN Changfu,ZHU Shimin,GAO Jie,et al. Kriging method-based creep model for anchor-soil interface considering grouting pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(sup 1):125-128.
- [17] 于永江,张伟,张国宁,等.富水软岩的蠕变特性实验及非线性剪切蠕变模型研究[J].煤炭学报,2018,43(6):1780-1788.
- YU Yongjiang,ZHANG Wei,ZHANG Guoning,et al.Study of nonlinear shear creep model and creep property experiment of water-rich soft rock[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(6):1780-1788.
- [18] 任光明,徐树峰,段雪琴,等.千枚岩的剪切流变特性研究[J].矿物岩石,2012,32(4):1-6.
- REN Guangming,XU Shufeng,DUAN Xueqin,et al. Shear rheological properties of phyllite[J].Journal of Mineralogy and Petrology,2012,32(4):1-6.
- [19] 张清照,沈明荣,丁文其.绿片岩软弱结构面剪切蠕变本构模型研究[J].岩土力学,2012,33(12):3632-3638.
- ZHANG Qingzhao,SHEN Mingrong,DING Wenqi. Study of shear creep constitutive model of greenschist structural plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3632-3638.
- [20] 李鹏,刘建.不同含水率软弱结构面剪切蠕变试验及模型研究[J].水文地质工程地质,2009,36(6):49-53,67.
- LI Peng,LIU Jian.Experimental and theoretical studies on the effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2009,36(6):49-53,67.
- [21] 侯宏江,沈明荣.岩体结构面流变特性及长期强度的试验研究[J].岩土工程技术,2003,17(6):324-326,353.
- HOU Hongjiang,SHEN Mingrong. Rheological properties of rockmass discontinuities and trial research of its long-term strength[J]. Geotechnical Engineering Technique,2003,17(6):324-326,353.
- [22] 石豫川,张倬元.二滩水电站右坝肩纤闪石化玄武岩软弱岩带流变特性的研究[J].成都地质学院学报,1991,18(2):72-81.
- SHI Yuchuan,ZHANG Zhuoyuan. A study on the rheological characteristics of the uralitized basalt weak rock band in the right abutment of Ertan Arch Dam[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),1991,18(2):72-81.