

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202301070



本刊网刊

## 受控于结构面的岩体定向剪切蠕变特性研究

耿文燕, 杨 涛\*, 纪李志, 谢江伟

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 高陡边坡在高地应力作用下经过长期蠕变变形积累, 易沿滑面发生失稳破坏, 而滑动面的蠕变性质受控于结构面。为探明结构面与剪切面夹角、间距对于岩体定向剪切蠕变特性的影响, 设计结构面剪切蠕变试验, 对 Barton 标准剖面线第 2 条 (粗糙度  $J_{RC}=3$ ) 结构面开展一定法向力作用下的直剪试验与直剪蠕变试验, 以确定其力学性能与蠕变力学性能。对室内试验得到的蠕变曲线进行分析, 拟合得到结构面蠕变本构模型及初步参数, 进一步基于数值分析对水平结构面试件模型进行直剪蠕变数值试验, 修正得到结构面最终本构参数。以此参数对不同夹角、间距的结构面岩体模型在不同荷载条件下进行数值分析, 对其破坏荷载、破坏前一级稳态蠕变速率等蠕变力学性质进行研究, 结果表明: 对于单结构面岩体, 当结构面与剪切面夹角小于等于  $14^\circ$  时, 剪切面蠕变由结构面控制, 剪切破坏基本沿结构面破坏; 对于多结构面岩体, 当结构面间距大于  $50\text{ mm}$  时, 可以不考虑其对于蠕变的影响; 提出剪切面上的结构面密度概念, 得到剪切面上结构面密度与破坏荷载的拟合公式; 破坏前的稳态蠕变速率对工程实际有着重要意义, 不仅与结构面特征有关系, 也与破坏荷载有关, 且破坏荷载的影响更大。

**关键词:** 直接剪切蠕变试验; 数值分析; 破坏荷载; 稳态蠕变速率

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)06-0222-09

边坡长期蠕变变形对于重大工程实践和自然环境保护都至关重要。位于高构造应力区的高陡岩质边坡, 其坡体应力水平高, 边坡岩体可能发生蠕变, 随着时间的不断推移, 边坡内部变形会逐渐积累, 从而导致边坡失稳或者影响工程结构安全<sup>[1]</sup>。边坡失稳会沿着滑动面发生, 滑动面上的蠕变控制着边坡的整体变形。一般而言, 边坡滑面与岩体结构面并不完全一致, 滑动面的剪切蠕变受控于结构面的蠕变特性<sup>[2-3]</sup>。为深入理解边坡沿滑面的蠕变破坏机制, 尤其是结构面对滑面的剪切蠕变力学特性的影响, 开展不同结构面特征下岩体定向剪切蠕变特性研究很有必要。

目前, 岩石流变力学研究已取得了一系列成果。一般认为软岩材料的流变特性十分明显, 而硬岩的流变特性则相对较弱<sup>[4]</sup>, 对硬岩而言, 岩体的强度、变形和稳定性等力学特性大多并不由岩石本身的特性所决定, 而是由岩体中结构面决定, 因此, 在高地应力水平状态下, 节理发育的硬岩也会产生一定程度的流变

效应<sup>[5]</sup>。同时, 国内外学者也对结构面蠕变特性进行了研究: Zhang 等<sup>[6]</sup>对不同粗糙度  $J_{RC}$  的贯通结构面进行剪切蠕变试验, 并对蠕变特性进行分析; 田光辉等<sup>[7]</sup>用水泥浇筑成不同角度的锯齿状结构面试样, 对试样进行蠕变特性研究; 张清照等<sup>[8]</sup>在 Flac<sup>3D</sup> 中, 对岩石赋予蠕变本构, 结构面采用接触面模型, 对规则齿形结构面剪切蠕变特性进行分析; Zhang 等<sup>[9]</sup>将伯格本构模型 (Burgers) 与非连续变形分析 (DDA) 方法相结合, 考虑结构面内的剪切蠕变变形, 提出了一种扩展 DDA 法; 熊良霄等<sup>[10]</sup>在 Flac<sup>3D</sup> 中, 将 interface 单元的法向、切向刚度转化为时间的蠕变函数, 提出了一种剪切蠕变试验的数值分析方法。

剪切面由结构面和岩石构成, 结构面对剪切面强度影响已有较多研究, 如刘伟等<sup>[11]</sup>对受结构面特征影响的层状岩体强度与破坏特征进行了较深入的分析。目前, 对于剪切面蠕变特性的研究较少。为此, 本文采用室内试验与数值分析结合的方式对此进行分析, 建立不同结构面特征的试件模型, 对其剪切面的蠕变力

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-02-19 网络出版日期: 2024-04-03

作者简介: 耿文燕 (2000—), 女, 硕士生。研究方向: 边坡工程及岩土本构。E-mail: 729gwy@my.swjtu.edu.cn

\* 通信作者: 杨 涛, 教授, E-mail: 03017003@163.com

学特征进行研究,探讨结构面特征对于剪切面的影响规律,拟为边坡工程中变形及安全性分析提供依据。

### 1 结构面蠕变试验

掌握结构面剪切蠕变特性的规律是揭示岩体时效变形与破坏的根本途径,由于天然岩体结构面取样困难及表面粗糙度难以界定,对于结构面的研究主要借助于人工节理,或在岩石试件中切割成缝,或用类岩石材料如混凝土和砂浆制成具有不同形态凸起体的人工不连续面,研究结构面的剪切蠕变规律和破坏特征<sup>[5]</sup>。本文采用混凝土砂浆浇筑的人工结构面进行室内试验,由于篇幅所限,以 $J_{RC}=3$ 结构面为例,开展结构面的剪切蠕变试验及直接剪切试验,为后续结构面本构选取及参数拟合提供依据。

直接剪切蠕变仪与试件如图 1 所示。剪切蠕变试验机主要由伺服电机和计算机测量与控制系统组成,自制的岩石直接剪切蠕变伺服仪如图 1(a)所示。轴向和剪切方向动力加载来源采用伺服电机加载装置,系统可自动进行加载恒定调节,压力允许偏差不高于所加压力值的 $\pm 1\%$ ,以保证加载稳定。采用全自动化操作,保证安全、实时、精确地分析蠕变全过程;采集一定时间间隔的位移数据,可有效避免人为操作对试验结果产生干扰,确保试验结果的有效性与可靠性,以满足试验要求<sup>[12-14]</sup>。

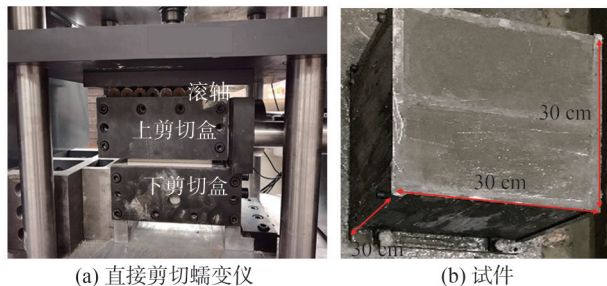


图 1 直接剪切蠕变仪与试件

Fig. 1 Direct shear creep test instrument and specimens

为得到 Barton 标准剖面线第 2 条( $J_{RC}=3$ )结构面的力学和蠕变力学参数,浇筑 3 组试件共 9 个试件(图 1(b)),分别进行直剪试验和直剪蠕变试验<sup>[15-17]</sup>,直剪试验得到的基质体与结构面力学参数如表 1 所示。

表 1 直剪试验得到的基质体与结构面力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of matrix and structural plane obtained from direct shear test

类型	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	单轴抗压强度 $R_c/\text{MPa}$	法向荷载 1 MPa 下的试件抗剪强度/MPa
结构面	1.510 7	36.856	1.013 4	1.211
基质体	24.943 0	56.848	28.074 0	5.275

在 1 MPa 法向荷载下,结构面瞬时剪切强度为 1.211 MPa。根据直剪蠕变试验规范,以瞬时强度为基准,直接剪切蠕变试验中剪切力分为 5 级加载,分别为 726.60、847.70、968.80、1 089.90、1 150.45 kPa,每级荷载维持 7 d。轴向荷载 1 MPa 下,水平结构面试件在分级水平剪切力作用下的直剪蠕变曲线,如图 2 所示。

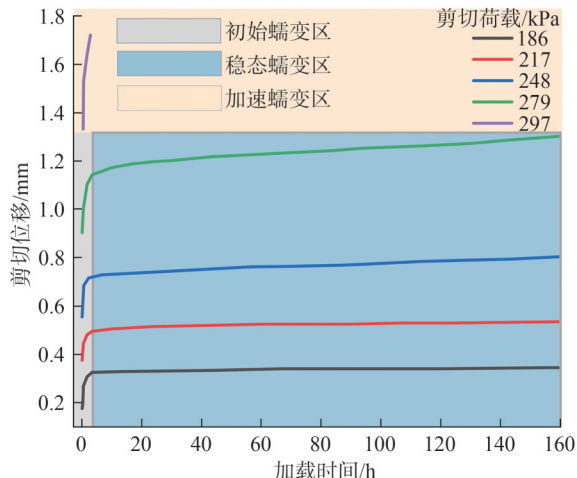


图 2 水平结构面岩体直剪蠕变曲线

Fig. 2 Shear creep curves of horizontal structural plane rock mass

由图 2 可知,岩体在各级剪切应力作用下,首先发生瞬时变形,随后进入蠕变阶段。低应力水平时,随着时间的增加,应变速率逐渐减小,但当时间增至一定程度后,应变趋于某恒定值;随着应力水平的增大,时间增大到一定程度,应变率趋于恒定,应变将持续增加,直至发生破坏。

结构面破坏示意图如图 3 所示。施加剪切力以后,岩石立即产生瞬时弹性应变,蠕变模型中应包含弹性元件;随着剪切荷载的增加,稳态蠕变阶段曲线随时间推移呈增大趋势,蠕变模型中还应包含黏性元件;当剪切荷载增加到一定程度时,结构面会迅速破坏,发生加速蠕变,即曲线也应该包含塑性元件。在较低的应力水平下,结构面蠕变表现为衰减蠕变和稳态蠕变,当剪切力水平达到某一应力水平时,试件在极短时间内迅速破坏。

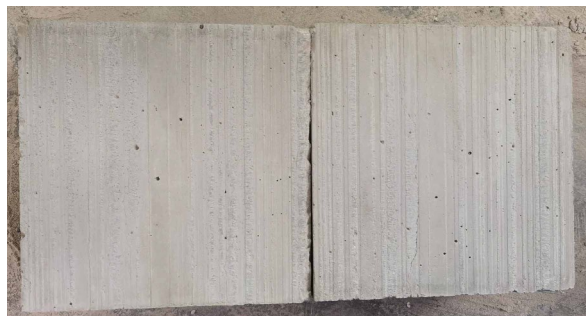


图 3 结构面破坏示意图

Fig. 3 Structural plane failure diagram

## 2 数值试验本构参数及其标定

### 2.1 数值力学试验步骤

现有研究对含结构面岩体蠕变数值试验的方法并无定论。发生蠕变时,由于岩体的各向异性特征,其力学特性均会发生不同程度的弱化。而结构面凹凸不平,发生剪切破坏时,在结构面的影响范围内可能发生滑移、剪断等现象,为更好地描述结构面蠕变变形过程、蠕变机制,故采用均质夹层替代结构面<sup>[18-20]</sup>。

同时,为便于与室内试验结果进行对比分析,建立尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm 的水平结构面数值力学模型。根据室内试验剪切破坏形态与应变计结果,考虑结构面起伏、结构面影响范围,用 20 mm 的夹层代替  $J_{RC}=3$  的硬性结构面。在岩体上部施加 1 MPa 的法向荷载,约束下部岩体的位移,对上部岩体施加分级剪切荷载,根据蠕变试验规范要求,进行剪切蠕变试验。监测剪切面平面 5 个点(0,0.075,0)、(0,0.150,0)、(0,0.225,0)、(-0.075,0.150,0)、(0.075,0.150,0)的水平位移平均值。数值模拟加载示意图如图 4 所示。

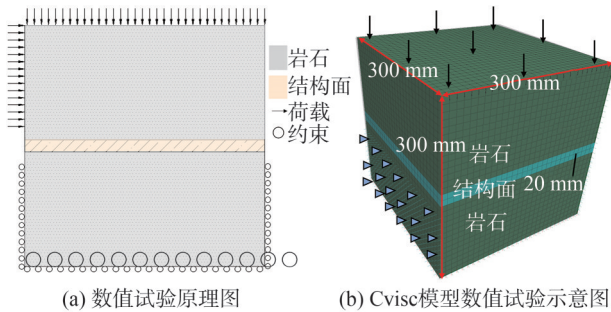


图 4 数值模拟加载示意图

Fig. 4 Numerical simulation loading diagram

### 2.2 Cvisc 黏弹塑性本构模型

由室内试验可知,结构面蠕变本构应包含弹性、塑性、黏性元件。在 Flac<sup>3D</sup> 中,选用 Cvisc 模型表征结构面的蠕变本构,该模型由 Burgers 模型和摩尔-库仑模型(Mohr-Coulomb)串联形成,Cvisc 本构模型如图 5 所示。图 5 中, $E_m$ 、 $E_k$  分别为麦克斯韦弹性模量和开尔文弹性模量, $\eta_m$ 、 $\eta_k$  分别为麦克斯韦黏性系数和开尔文黏性系数, $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_k$  和  $\varepsilon_p$  分别为麦克斯韦体、开尔文体的应变和塑性应变<sup>[21-23]</sup>。

为得到  $J_{RC}=3$  的硬性结构面的 Burgers 模型参数,需对 Burgers 模型的参数进行拟合。基于 Burgers 模型的蠕变方程,拟合对应的应变-时间曲线,进而得到蠕变方程中的参数  $E_m$ 、 $E_k$  与  $\eta_m$ 、 $\eta_k$ 。Burgers 模型 1 维蠕变方程  $\varepsilon(t)$  为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0}{\eta_m} t + \frac{\sigma_0}{E_k} \left( 1 - e^{-\frac{E_k}{\eta_k} t} \right) \quad (1)$$

式中, $\sigma_0$  为应力, $t$  为时间。

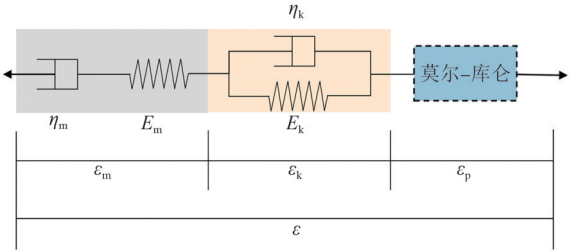


图 5 Cvisc 本构模型

Fig. 5 Cvisc constitutive model

目前,最常用的曲线拟合方法是最小二乘法,但对于非线性问题的求解,其存在初值选取困难、收敛速度较慢及易收敛于局部极小点等问题。因此,为克服以上缺陷,采用列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt)对蠕变试验曲线进行拟合与参数辨识。

对试验数据进行优化提取,室内试验每一阶段的加载曲线进行拟合,取得  $E_m$ 、 $E_k$ 、 $\eta_m$  和  $\eta_k$  这 4 个参数的数值,Burgers 模型参数辨识结果如表 2 所示。

表 2 Burgers 模型参数辨识结果

Tab. 2 Parameter identification results of burgers model

水平荷载/kPa	$E_m/(10^8 \text{ Pa})$	$\eta_m/(10^{10} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$E_k/(10^8 \text{ Pa})$	$\eta_k/(10^{14} \text{ Pa}\cdot\text{s})$
186	1.50	1.22	5.60	5.75
217	2.94	10.20	1.68	12.80
248	4.47	48.80	1.21	24.60
279	12.40	49.70	1.06	13.70
平均	5.32	27.50	9.55	14.20

### 2.3 Cvisc 本构模型参数标定

建立的数值力学模型中,基质体与结构面均采用 Cvisc 黏弹塑性本构,塑性参数( $c$ 、 $\varphi$ )采用室内试验,而由于参数拟合是针对硬性结构面,在数值试验中将结构面简化成均质薄层,为确保数值模型的准确性与真实性,需通过数值试验对初步拟合得到的结构面的黏弹性参数( $E_m$ 、 $E_k$ 、 $\eta_m$ 、 $\eta_k$ )修正标定,得到最终结构面薄层的本构参数。

同时,由于本研究的主要内容是结构面对滑面蠕变特性的影响,且岩石基质体在较低水平应力状态下,蠕变现象可忽略<sup>[24-26]</sup>。因此,对比岩块类型的相似性,基质体采用丁秀丽等<sup>[27]</sup>的数值分析参数。

采用水平结构面岩体试件进行直剪蠕变试验数值模拟,通过试错法,调整结构面蠕变参数,使数值模拟得到的位移-时间曲线与室内试验基本一致,修正

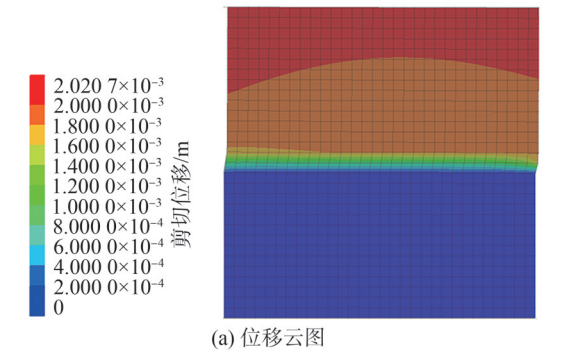
得到结构面最终参数,结构面 Cvisc 模型的最终数值模拟参数如表 3 所示。

表 3 数值模拟参数

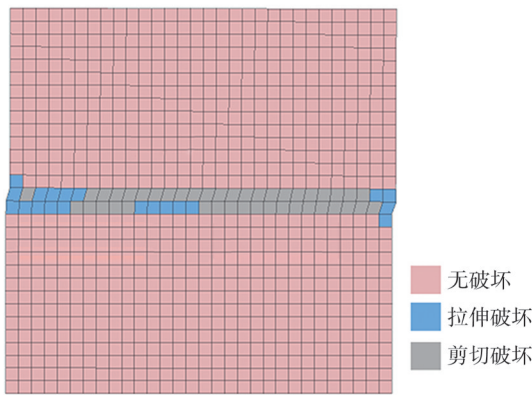
Tab. 3 Numerical simulation parameter

类型	$E_k/(10^8 \text{ Pa})$	$\eta_k/(10^{11} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$E_m/(10^8 \text{ Pa})$	$\eta_m/(10^{15} \text{ Pa}\cdot\text{s})$
结构面	5.32	2.75	9.55	1.42
岩块	10.00	8 640.00	20.00	8.64

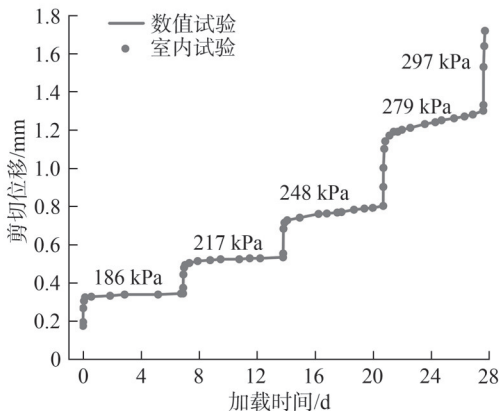
轴向荷载、水平荷载分级与室内试验一致,用表 3 的参数进行数值模拟,水平结构面试件加载曲线与室内水平结构面试件基本一致,得到的蠕变曲线如图 6 所示。



(a) 位移云图



(b) 塑性区状态云图



(c) 剪切蠕变曲线

图 6 数值模拟剪切蠕变

Fig. 6 Numerical simulation of shear creep

### 3 岩体定向剪切蠕变规律

#### 3.1 不同结构面与剪切面的夹角对剪切面蠕变的影响

数值模型考虑了结构面与剪切面的夹角(结-剪角)按 10°间隔从 0°~90°取值。数值计算中,试件在轴向荷载为 1.0 MPa 作用下,剪切力从第 1 级 0.5 MPa 开始每级增加 0.5 MPa。模型曲线在 10°~20°急剧变化,为了得出更精准的范围,在 10°~20°间每隔 1°增加一个模型进行计算。不同结-剪角下岩体的位移云图如图 7 所示。由图 7 可知:当结-剪角范围为(0°, 14°]时,基本上岩体都沿结构面发生破坏;当结-剪角大于 14°时,剪切面破坏逐渐由基质体起主导作用。

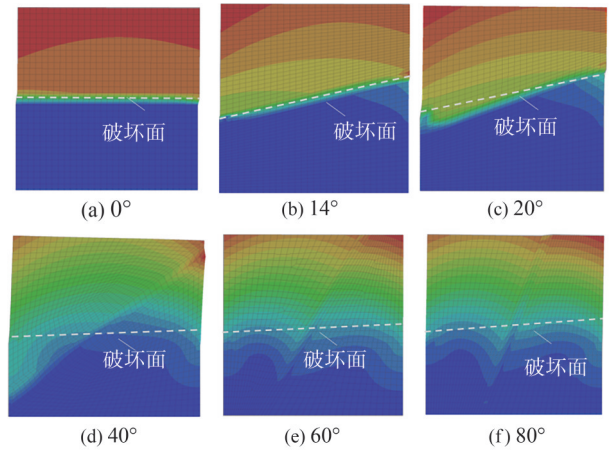


图 7 不同结-剪角下岩体剪切位移云图

Fig. 7 Shear displacement cloud diagram of rock mass under different junction-shear-angle

不同结构面与剪切面的夹角下剪切蠕变曲线如图 8 所示。由图 8 可知,结构面岩体蠕变曲线都包括 3 个阶段:初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段。发生破坏之前的每一级加载曲线都是位移急剧增加,然后趋于平缓,当结-剪角范围为(0°, 14°]时,岩体剪切蠕变曲线形态相似:在蠕变的整体变化趋势上,曲线在加载瞬间有一个瞬时变形。当施加的应力水平较低时,蠕变曲线就已发生较为明显的衰减和等速蠕变两阶段,应变值随着时间的增加而增大。当超过破坏荷载时,应变值急剧增大,发生破坏并加速蠕变,且基本上都沿结构面破坏,即结构面控制岩体的破坏。

当结-剪角大于 14°时,岩体剪切蠕变曲线形态发生较大变化,当施加的应力水平较低时,变形经衰减蠕变逐步过渡到稳定蠕变阶段,应变值不再随时间的增加而增大;当施加的应力水平超过某一应力时,才会发生等速蠕变。

图 9 为不同结-剪角下结构面对于岩体破坏荷载的影响。当结-剪角范围为(0°, 14°]时,破坏荷载基本一致,与结构面的破坏荷载接近;随着结-剪角的增

大,破坏荷载急剧增大,越来越接近基质体的破坏荷载,这也一定程度上证明了当结-剪角范围为 $(0^\circ, 14^\circ]$ 时,剪切蠕变基本由结构面控制。由图9可知,当结-剪角范围为 $(0^\circ, 14^\circ]$ 时,结构面对剪切面的蠕变起主要控制,当结-剪角大于 $14^\circ$ 时,剪切蠕变不仅与结构面有关,也与基质体有关。

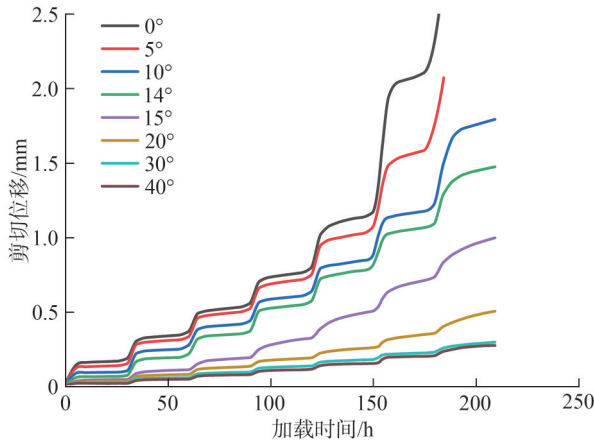


图8 不同结-剪角下剪切蠕变曲线

Fig. 8 Shear creep curves at the different angle between structural planes and the shear plane

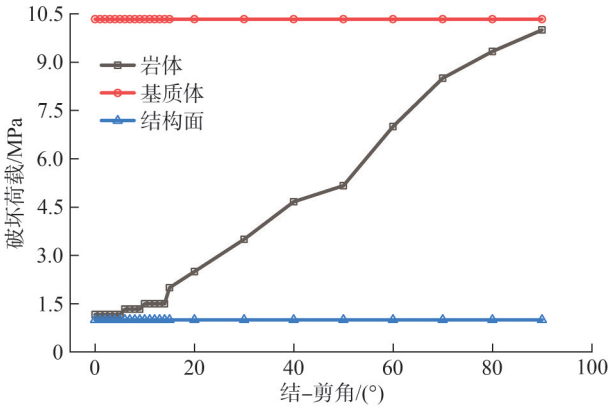
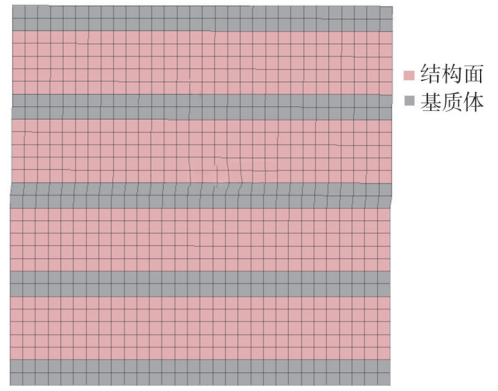


图9 不同结构面-剪切面夹角下岩体破坏荷载

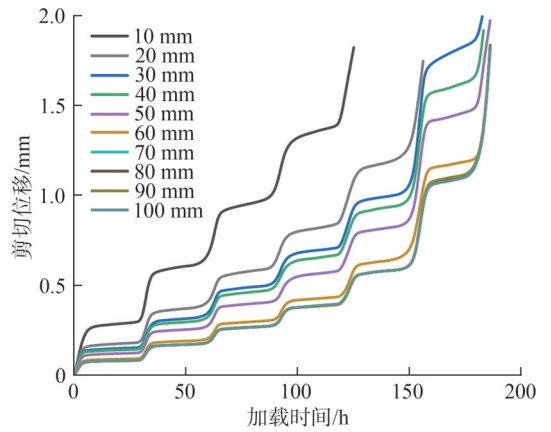
Fig. 9 Failure load at the different structural planes angles

### 3.2 不同结构面间距对岩体剪切蠕变效应的影响

不同结-剪角下,在10~100 mm区间每隔10 mm建立一个模型进行不同结构面间距下的剪切蠕变数值计算。以结构面夹角 $0^\circ$ 下不同厚度水平结构面剪切蠕变为例,得出不同厚度水平结构面剪切蠕变如图10所示。由图10可知,不同间距结构面岩体模型蠕变曲线形态相似,每一级加载后,发生瞬时蠕变,然后发生稳定蠕变。随着剪切荷载增大,稳定蠕变速率也随之增大。但整体变形量不同,随着间距增加,位移逐步减小,当结构面间距为50 mm时,曲线形态与变形量都基本一致。可得,50 mm是控制结构面蠕变的临界值,当结构面间距小于50 mm时,剪切面蠕变全部由结构面控制,此时可不考虑间距对蠕变的影响。



(a) 数值模拟模型



(b) 剪切蠕变曲线

图10 不同厚度水平结构面剪切蠕变

Fig. 10 Shear creep of structural plane of different thicknesses

在不同结构面间距下破坏荷载的结果如图11所示。由图11可知:同一结-剪角下,不同间距和单条结构面岩体的破坏荷载基本一致,当结构面间距减小到一定程度时,破坏荷载会急剧减小;随着结构面间距增大,破坏荷载会增大,当间距增大到100 mm时,破坏荷载和单条结构面岩体基本一致。当结-剪角范围为 $(0^\circ, 14^\circ]$ 时,间距为10、20 mm时岩体破坏荷载最小,结构面间距大于30 mm的岩体破坏荷载一致。当结-剪角大于 $14^\circ$ 时,随着角度的增大,结构面间距减小到一定程度,剪切蠕变仍由结构面控制。

不同结构面密度 $A$ 稳态蠕变速率如图12所示。由图12可知:同一结-剪角下,随着结构面密度的增大,破坏荷载前一级稳定蠕变剪切速率呈减小趋势;相同结-剪角下,破坏荷载相同,随着结构面密度增大,破坏荷载前一级剪切速率减小。

因此,结构面剪切蠕变速率不仅与结构面间距有关,还与破坏荷载有关。剪切蠕变速率不仅和结-剪角有关,也与破坏荷载有关。在同一破坏荷载下,结-剪角越大,剪切蠕变速率越小。而当结-剪角增大时,破坏荷载增加,剪切蠕变速率也增大。

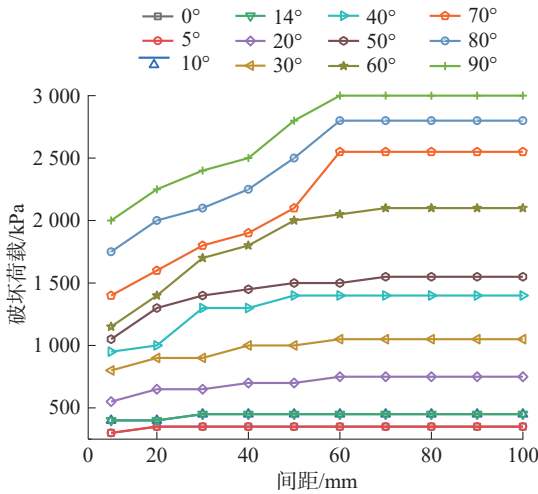


图 11 不同结构面间距下破坏荷载

Fig. 11 Failure loads at different structural surface spacing

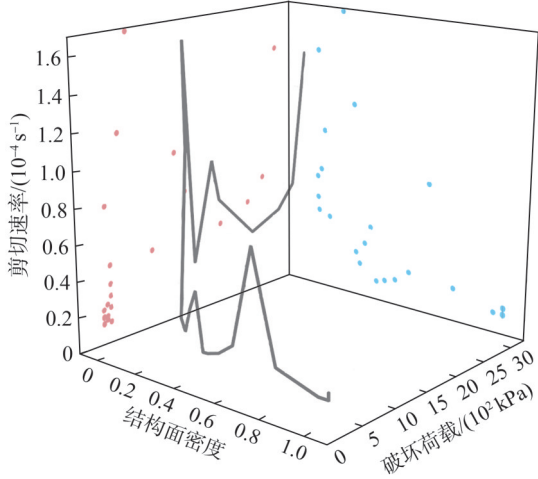


图 12 不结构面密度的稳态蠕变速率

Fig. 12 Steady creep rate at different structure surface density

### 3.3 结构面密度对试件破坏荷载的影响分析

为更好地分析结构面对于岩体蠕变的影响,采用结构面密度评价岩体中结构面的发育程度,借鉴结构面线密度的定义,定义剪切面上的结构面密度为:

$$A = \frac{n}{l \sin \alpha} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $n$ 为剪切面上结构面的条数; $\alpha$ 为结构面与剪切面之间的夹角; $l$ 为剪切面长度,mm。

不同结构面占比与破坏荷载的关系如图 13 所示。由图 13 可知:结构面密度对试件的破坏荷载(长期强度)有显著的影响,结构面密度越大,试件破坏荷载越小;反之,结构面占比越小,破坏荷载越大。

通过回归分析可得到拟合式为:

$$\sigma_T = 6\,170.8A^{-0.526} \quad (3)$$

式中, $\sigma_T$ 为破坏荷载,kPa。

由式(3)分析可知,结构面密度对试件的极限承载强度呈现出幂指数函数关系,随着结构面密度的增

大,试件的破坏荷载在减小,试件的长期强度也逐渐由基质体控制转变为结构面控制。在实际工程应用中,通常将岩体结构面视为具有一定厚度的软弱夹层,且该软弱夹层的强度、刚度往往低于岩石基质体。因此,随着结构面密度的增大,岩体的长期强度逐渐转变为软弱结构面的长期强度。

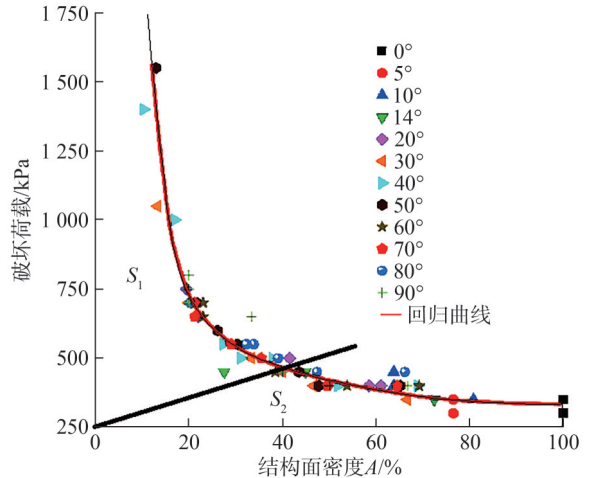


图 13 不同结构面密度与破坏荷载的关系

Fig. 13 Relationship between the proportion of different structural planes and failure load

同时,为计算试件极限强度受结构面控制的临界结构面密度,设置线性 1 阶函数为:

$$\sigma_T = kA \quad (4)$$

图 13 中,通过积分计算式(3)、(4)与坐标轴  $A$ 、 $\sigma_T$  的包络面积  $S_1$ 、 $S_2$ ,使  $S_1=S_2$ ,此时可得,临界曲线  $\sigma_T=kA$  的斜率  $k=21.344$ ,进而计算得到临界的结构面密度为 40.99%。因此,当结构面密度超过 40.99% 时,层状岩体的蠕变破坏强度受结构面密度的改变而发生的变化逐渐降低,试件整体强度逐渐转变为受结构面控制。

## 4 结 论

1)对于单结构面岩体,不同结-剪角对于岩体的影响很大。当结-剪角度小于等于  $14^\circ$  时,剪切面蠕变曲线由结构面控制,蠕变曲线形态与结构面蠕变曲线相似。当结-剪角大于  $14^\circ$  时,受基质体影响较大,因而蠕变曲线发生较大变化,与基质体蠕变曲线相似,在较低应力下,基本不发生蠕变。

2)破坏荷载前一级稳态蠕变速率不仅仅和结构面特征有关还和破坏荷载有关。在同一破坏荷载下,结-剪角越大,剪切蠕变速率越小;当结-剪角变大时,破坏荷载变大,剪切蠕变速率反而会变大;比起结构面特征,破坏荷载对剪切蠕变速率的影响更大。

3)对于不同结构面间距的岩体来说,相同结-剪角下,结构面间距越大,蠕变破坏荷载越接近单条结构面蠕变曲线;反之,当结构面间距减小到一定程度

时(50 mm),剪切位移相似,岩体蠕变曲线更接近单条结构面,即当结构面间距大于 50 mm 时,岩体剪切蠕变力学性质与结构面相似,可以不考虑结构面间距对于剪切面的影响。

4)得到了关于剪切面上结构面密度与破坏荷载的拟合公式  $\sigma_T = 6170.8A^{-0.526}$ ,岩体整体强度转变为结构面控制的临界结构密度为 40.99%。

#### 参考文献:

- [1] 王小平.岩质边坡分析中的流变问题[C]/第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会,Minneapolis:Itasca Consulting Group,Inc.,2006.
- [2] Yi Shun,Yue Kedong,Chen Jian,et al.Risk analysis of two-layer clay slopes considering spatial variability of shear strength[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(Supp2):112–116.[易顺,岳克栋,陈健,等.考虑抗剪强度空间变异性的双层黏土边坡风险分析[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):112–116.]
- [3] Cheng Hongzhan,Chen Jian,Chen Renpeng,et al.Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties[J].Computers and Geotechnics,2018,103:61–72.
- [4] Wang Rubin,Xu Weiya,Wang Wei,et al.Experimental investigation on creep behavior of hard rock in dam foundation and its seepage laws during complete process of rock creep[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):960–969.[王如宾,徐卫亚,王伟,等.坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):960–969.]
- [5] Sun Jun.Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(6):1081–1106.[孙钧,岩石蠕变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081–1106.]
- [6] Zhang Qingzhao,Wu Chuangzhou,Fei Xunchang,et al.Time-dependent behavior of rock joints considering asperity degradation[J].Journal of Structural Geology,2019,121:1–9.
- [7] Tian Guanghui,Shen Mingrong,Zhang Qinqhao,et al.Study on shear creep,relaxation and long term strength of serrate structure surface[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(6):120–129.[田光辉,沈明荣,张清照,等.锯齿状结构面剪切蠕变、松弛及长期强度研究[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):120–129.]
- [8] 张清照,沈明荣.岩体结构面剪切蠕变特性研究[M].上海:同济大学出版社,2018.
- [9] Zhang Guoxin,Lei Zhengqi,Cheng Heng.Shear creep simulation of structural plane of rock mass based on discontinuous deformation analysis[J].Mathematical Problems in Engineering,2017,2017:1582825.
- [10] Xiong Liangxiao,Yu Lijun,Yang Changbin.Shear rheological model for hard structural surface and test numerical analysis[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(Supp1):2894–2899.[熊良宵,虞利军,杨昌斌.硬性结构面的剪切蠕变模型及试验数值分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2894–2899.]
- [11] Liu Wei,Zeng Yawu,Xia Lei,et al.Model tests for strength and failure characteristics of forward and reverse shear rock masses[J].Engineering Journal of Wuhan University,2019,52(7):600–609.[刘伟,曾亚武,夏磊,等.正反向直剪下层状岩体强度和破坏特征模型试验[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(7):600–609.]
- [12] Xu Huining,Liu Jianfeng,Ren Haonan,et al.Experimental studies on the rheological properties of marble rock mass [J].Experiment Science and Technology,2018,16(2):18–24 [徐慧宁,刘建锋,任浩楠,等.大理岩裂隙岩体流变特性试验研究[J].实验科学与技术,2018,16(2):18–24.]
- [13] Hamza O,Stace R.Creep properties of intact and fractured muddy siltstone[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,106:109–116.
- [14] Xue Zhongfei,Cheng W C,Wang Lin.Effect of straw reinforcement on the shearing and creep behaviours of Quaternary loess[J].Scientific Reports,2021,11(1):19926.
- [15] 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.[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.]
- [16] Zhang Qingzhao,Shen Mingrong,Jang B A,et al.Creep behavior of rocks with rough surfaces[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(9):04016063.
- [17] Liu Ang,Lin Wenli,Jiang Jingcai.Laboratory and constitutive analysis of relaxation tests for time-dependent properties of discontinuities[J].Construction and Building Materials,2019,227:116688.
- [18] Wu L Z,Li B,Huang R Q,et al.Experimental study and mo-

- deling of shear rheology in sandstone with non-persistent joints[J].Engineering Geology,2017,222:201–211.
- [19] Xiong Liangxiao, Li Tianbin, Yang Changbin, et al. Numerical analysis study on uniaxial and biaxial compression creep tests for interlayered rock mass[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1539–1548. [熊良宵, 李天斌, 杨昌斌, 等. 层状岩体单轴和双轴压缩蠕变特性的数值试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1539–1548.]
- [20] Jia C J, Xu W Y, Wang R B, et al. Experimental investigation on shear creep properties of undisturbed rock discontinuity in Baihetan Hydropower Station[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 27–33.
- [21] Luo Zejun, Zhang Qingzhao, Shi Zhenming, et al. Shear creep characteristics of red sandstone discontinuities considering different morphologies[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4484–4497. [罗泽军, 张清照, 石振明, 等. 考虑表面形貌特征的岩体结构面蠕变特性[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4484–4497.]
- [22] Su Teng, Zhou Hongwei, Zhao Jiawei, et al. A creep model of rock based on variable order fractional derivative[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019 (7): 1355–1363. [苏腾, 周宏伟, 赵家巍, 等. 基于变阶分数阶导数的岩石蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019 (7): 1355–1363.]
- [23] Wu Fei, Zhang Hao, Zou Quanle, et al. Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory[J]. Mechanics of Materials, 2020, 150: 103600.
- [24] Wu L Z, Li S H, Sun P, et al. Shear creep tests on fissured mudstone and an improved time-dependent model[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(11): 4797–4808.
- [25] Hou Rongbin, Zhang Kai, Tao Jing, et al. A nonlinear creep damage coupled model for rock considering the effect of initial damage[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(5): 1275–1285.
- [26] Xue Zhongfei, Cheng W C, Wang Lin. Effect of straw reinforcement on the shearing and creep behaviours of Quaternary loess[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 19926.
- [27] Cheng Hongzhan, Chen Jian, Chen Renpeng, et al. Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103: 61–72.

## Study on Directional Shear Creep Characteristics of Rock Mass Controlled by Structural Plane

GENG Wenyan, YANG Tao\*, JI Lizhi, XIE Jiangwei

(School of Civil Engineering, Southwest JiaoTong University, Chengdu 610031, China)

### Abstract:

**Objective** Long-term creep deformation of a slope is significant for major engineering practice and the natural environment. A high and steep rock slope located in a high tectonic stress area can creep due to the elevated stress level of the slope. After long-term creep deformation accumulates, it can lead to the instability of the slope along the sliding surface. At this stage, the creep on the sliding surface controls the overall deformation of the slope. In general, the slope sliding surface is not entirely consistent with the rock mass structural plane, while the shear creep of the sliding surface is governed by the creep characteristics of the structural plane. Generally, the slope sliding surface is not entirely consistent with the rock mass structural plane, yet the shear creep of the sliding surface remains governed by the creep characteristics of the structural plane.

**Methods** This study examined the effects of the angle and spacing between different structural planes and shear planes on the directional shear creep characteristics of the rock mass to thoroughly understand the creep failure mechanism of the slope along the slip surface, particularly the influence of the structural plane on the shear creep mechanical properties of the slip surface. The shear creep tests of the structural plane were designed, and the direct shear test and direct shear creep test under a certain normal force were conducted on the second ( $J_{RC}=3$ ) structural plane of the Barton standard joint profiles to determine its mechanical and creep mechanical properties. The creep curve obtained from the laboratory test was analyzed and fitted to establish the creep constitutive model and preliminary parameters of the structural plane. Based on numerical analysis, the direct shear creep numerical test was conducted on the horizontal structural plane specimen model, and the final constitutive parameters of the structural plane were obtained. Using these parameters, the numerical analysis of rock mass models under different angles between structural planes and the shear plane, and different spacings of structural planes was conducted.

**Results and Discussion** Through these numerical experimentations, the creep mechanical properties, such as failure load and steady-state creep

rate before failure, were analyzed. The results indicated that, for the rock mass with a single structural plane, different angles between structural planes and the shear plane significantly influenced the rock mass. When the angle between structural planes and the shear plane was less than  $14^\circ$ , the creep curve of the shear plane was controlled by the structural plane, and the shape of the creep curve resembled that of the structural plane. When the angle between structural planes and the shear plane was greater than  $14^\circ$ , the creep behavior was strongly influenced by the matrix, so the creep curve changed considerably, resembling that of the matrix. Under lower stress, creep did not essentially occur. The steady-state creep rate of the first stage before failure has great significance for practical engineering applications. The steady-state creep rate of the first stage before the failure load was related to the characteristics of the structural plane and the failure load. Under the same failure load, the larger the knot-shear angle, the smaller the shear creep rate. When the knot-shear angle increases, the failure load rises, and the shear creep rate also improves. Compared to the characteristics of the structural plane, the failure load has a greater influence on the shear creep rate. For the rock mass with different structural plane spacings, at the same knot-shear angle, a larger structural plane spacing causes the creep failure load to occur closer to the single structural plane creep curve.

**Conclusions** When the spacing of structural planes was reduced to a certain extent, such as when the spacing was 50 mm, the shear displacement was similar, and the creep curve of the rock mass was closer to that of a single structural plane. When the spacing of structural planes was greater than 50 mm, the shear creep mechanical properties of the rock mass were similar to those of structural planes, and the influence of structural plane spacing on the shear plane can be ignored. The fitting formula between the density of the structural plane on the shear plane and the failure load was obtained. The critical structural density of the overall strength of the rock mass was 40.99%.

**Key words:** direct shear creep test; numerical analysis; failure loads; steady creep rate of the previous stage

(编辑 周璇)

引用格式: Geng Wenyan, Yang Tao, Ji Lizhi, et al. Study on directional shear creep characteristics of rock mass controlled by structural plane[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6): 222–230. [耿文燕, 杨涛, 纪李志, 等. 受控于结构面的岩体定向剪切蠕变特性研究[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(6): 222–230.]