

# 坝肩高边坡层间错动带剪切蠕变特性与模型研究

陈兴周<sup>1</sup>, 李建林<sup>2</sup>, 柴军瑞<sup>1,2</sup>, 白俊光<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 高坝工程坝肩边坡岩体深部层间错动带的蠕变力学特性与蠕变损伤特性, 直接影响着水电工程的长期稳定性与整体安全性。以某坝肩高边坡岩体层间错动带的剪切蠕变力学试验为基础, 研究了层间错动带的剪切蠕变力学特性, 分析了层间错动带的长期剪切强度参数和加速蠕变特性及蠕变速率变化特征; 通过对层间错动带加速蠕变过程中损伤演化特性的分析, 研究了考虑层间错动带岩体力学参数弱化和伴随加速蠕变变化的蠕变损伤效应, 并基于西原流变模型和蠕变损伤演化方程, 建立了能够反映高边坡层间错动带蠕变损伤演化过程的本构模型; 而后通过对比数据拟合结果与试验结果, 对提出的本构模型进行验证, 显示所建立本构模型的正确性与合理性。

**关键词:** 坝肩高边坡; 层间错动带; 剪切蠕变力学试验; 蠕变本构模型; 参数损伤劣化效应

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)09-1675-08

**作者简介:** 陈兴周(1980-), 男, 陕西周至人, 博士研究生, 主要从事边坡稳定与岩土体渗流研究。E-mail: xzchen0416@163.com。

## Shear creep characteristics and constitutive model for interlayer shear belt of high abutment slopes

CHEN Xing-zhou<sup>1</sup>, LI Jian-lin<sup>2</sup>, CHAI Jun-rui<sup>1,2</sup>, BAI Jun-guang<sup>3</sup>

(1. College of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Civil Engineering and

Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Northwest Hydro Consulting Engineering, CHECC, Xi'an

710065, China)

**Abstract:** The creep characteristics and damage properties of interlayer shear belt of high abutment slopes affect the long-term stability of high dam projects. The shear creep mechanic characteristics of interlayer shear belt are studied based on the shear creep mechanic test, and the long-term shear strength parameters, accelerated creep properties and change rules of shear creep rate are analyzed. By analyzing the rules of creep damage evolution of interlayer shear belt, the damage degradation effects of mechanical parameters over time and over accelerated creep are discussed. Based on the Nishihara creep model and the creep damage evolution equations, a creep damage model is proposed to reflect the creep damage process of interlayer shear belt of slopes completely. The comparison between the calculated results of creep damage model and the test results show that the proposed creep damage model for interlayer shear belt of slopes is available and reasonable.

**Key words:** high abutment slope; interlayer shear belt; shear creep characteristic test; creep constitutive model; damage degradation effect of parameters

## 0 引言

层间错动带的分布具有普遍性, 广泛存在于众多水电工程岩质高边坡岩体中。由于岩体中层间错动带的存在, 在外力荷载作用下, 容易致使岩体上部岩层沿层间错动带发生蠕变滑移, 进而与下覆岩层之间产生较大的相对错位, 加大了岩体整体失稳的可能性, 从而直接影响着水电工程及其岩质高边坡的长期持续稳定性。因此, 岩体内部层间错动带蠕变力学特性引起了研究者的重视。

孙钧等<sup>[1]</sup>探讨和分析了软岩、节理发育岩体和层间错动带蠕变力学特性的相关研究现状, 认为对于富含层间错动带的岩体, 研究岩体沿错动带的剪切蠕变力学特性十分重要。丁秀丽等<sup>[2]</sup>着重分析了岩体内部节理、层间错动带等结构面在恒定荷载作用下的蠕变形态, 认为其剪切蠕变位移不仅是加载持续时间的函

基金项目: 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015)

收稿日期: 2013-04-10

数,且与所施加的法向压应力和剪切应力的大小有关。

室内试验和现场试验是研究岩体层间错动带蠕变力学特性的基础。杨圣奇等<sup>[3]</sup>基于龙滩水电站软硬相间的层间错动带的剪切流变试验成果,分析了泥板岩剪切位移随时间的变化规律,探讨了不同应力状态下剪切流变速率的变化趋势和岩石剪切强度随时间的变化规律。张治亮等<sup>[4]</sup>针对向家坝水电站左岸坝基开挖过程中揭露出的层间挤压带含弱面砂岩进行了剪切蠕变试验,结果表明岩石内部微裂隙随剪应力水平和时间的增长而不断扩展直至贯通,进而致使岩石发生剪切破坏。许东俊<sup>[5]</sup>基于层间错动带的现场蠕变试验,得到了不同剪应力作用下蠕变试验曲线,发现其变形特性基本呈现减速蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段。徐鼎平等<sup>[6]</sup>基于链子崖层间错动带的剪切蠕变试验成果,分析了层间错动带的蠕变力学特性。

基于剪切蠕变的试验成果,一些反映层间错动带蠕变力学特性的本构模型也随之发展起来。伍国军等<sup>[7]</sup>根据工程现场压缩蠕变试验成果,提出工程岩体流变效应的损伤因子,建立了非线性损伤黏弹塑性本构模型。吕爱钟等<sup>[8]</sup>基于页岩蠕变试验结果,认为考虑参数时间相关性的非定常黏弹性模型可更为准确地反映岩石的黏弹性变形性能。张治亮等<sup>[9]</sup>基于向家坝水电站坝基挤压带岩石蠕变试验成果,建立了新的非线性黏弹塑性蠕变模型。徐鼎平等<sup>[6]</sup>提出了一种屈服面蠕变模型,该模型可以反映层间错动带剪切滑移破坏机制。杨圣奇等<sup>[3]</sup>通过将加速蠕变启动元件与 Burgers 模型串联,建立了新的岩石六元非线性黏弹塑性蠕变模型,并从理论上对其蠕变力学特性进行讨论。

目前,针对层间错动带蠕变试验与模型的研究虽然取得了一些成果,但还存在很多不足,主要体现在:

(1) 室内和现场试验的目的性和针对性不是很强,对于层间错动带岩体长期力学特性研究不够,应以建立反映工程实际的层间错动带蠕变力学本构模型为目的,总体考虑剪切蠕变试验方案,摸清层间错动带自身的剪切滑移蠕变破坏机制。

(2) 对于水电工程高边坡而言,影响其内部层间错动带蠕变变形的因素十分复杂,除了错动带的接触状态、充填物性质、风化程度等因素,还包括水岩耦合作用、应力荷载作用等外部条件。因此,在这些复杂因素影响下,所建立的蠕变力学本构模型应尽量考虑具体的工程实际,尽可能反映岩体层间错动带内在的剪切蠕变破坏机制。

本文以某大型水电工程坝肩高边坡岩体深部层间错动带为研究对象,开展了分级荷载作用下的剪切蠕变力学试验,分析了层间错动带的长期强度参数和长

期蠕变特性,提出了考虑加速蠕变过程中力学参数损伤演化的蠕变本构方程,结合试验成果进行了参数辨识和模型验证。

## 1 层间错动带剪切蠕变力学试验研究

### 1.1 坝肩高边坡中的层间错动带

含层间错动带岩体的存在具有普遍性,其剪切蠕变破坏与岩体所处的应力水平、岩体质量及层间错动带与临空面的组合形式密切相关。水电工程中高坝坝基、大型地下洞室、岩石高陡边坡等工程岩体内部的层间错动带穿切岩体,与工程岩体的临空面形成较大角度,并出露在临空面的中上部,其产状与临空面的出露位置构成了不利组合;在外荷载长期作用下,上部岩层沿层间错动带蠕变滑移,致使上、下岩层产生相对错位,进而造成工程岩体的蠕变变形和整体失稳破坏,其概念模型如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

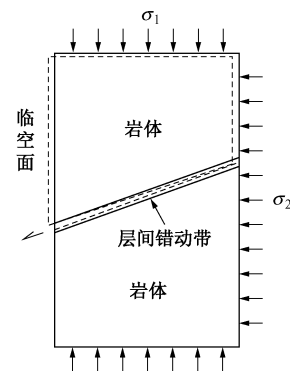


图 1 岩体层间错动带概念模型<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Interlayer shear belt of abutment of rock mass<sup>[6]</sup>

### 1.2 层间错动带剪切蠕变力学试验

高坝工程坝肩边坡岩体深部层间错动带的蠕变力学特性与蠕变损伤特性,直接影响着水电工程的长期稳定性与整体安全性。为揭示岩体层间错动带的这一特性,显然通过剪切蠕变力学试验这一途径是比较适合的。例如,某水电站高坝坝址区勘探所揭示的坝肩高边坡岩体层间挤压错动带如图 2 所示,其岩体构造表现为强风化砂岩,局部具有泥化特性,主要由长石、石英等组成;块状构造,呈现碎屑、碎裂结构。

本文从工程现场坝肩所揭示的层间挤压错动带区域,制取了错动带块状岩体,制备了剪切蠕变试验岩样,试件标准  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ,层间错动带位于试件中部。利用大型剪切流变试验系统,分别按照法向应力为  $0.40, 0.60, 0.80$  和  $1.00\text{ MPa}$  的试验方案,采用分级加载( $\tau$ )的方式进行了直剪蠕变试验,每一级加载时间为  $6 \sim 7\text{ d}$ 。

通过试验数据分析和整理,将该层间错动带的剪切蠕变试验结果列述如下(如图 3 所示)。

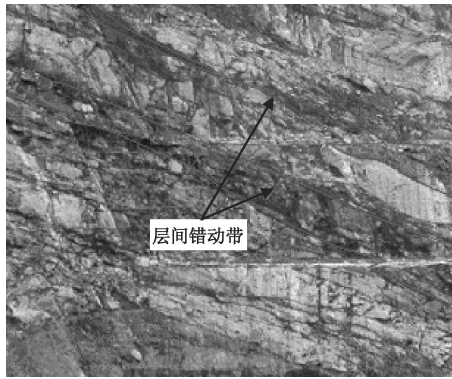


图 2 典型坝肩高边坡岩体层间挤压错动带

Fig. 2 Typical interlayer shear belt of high abutment slope

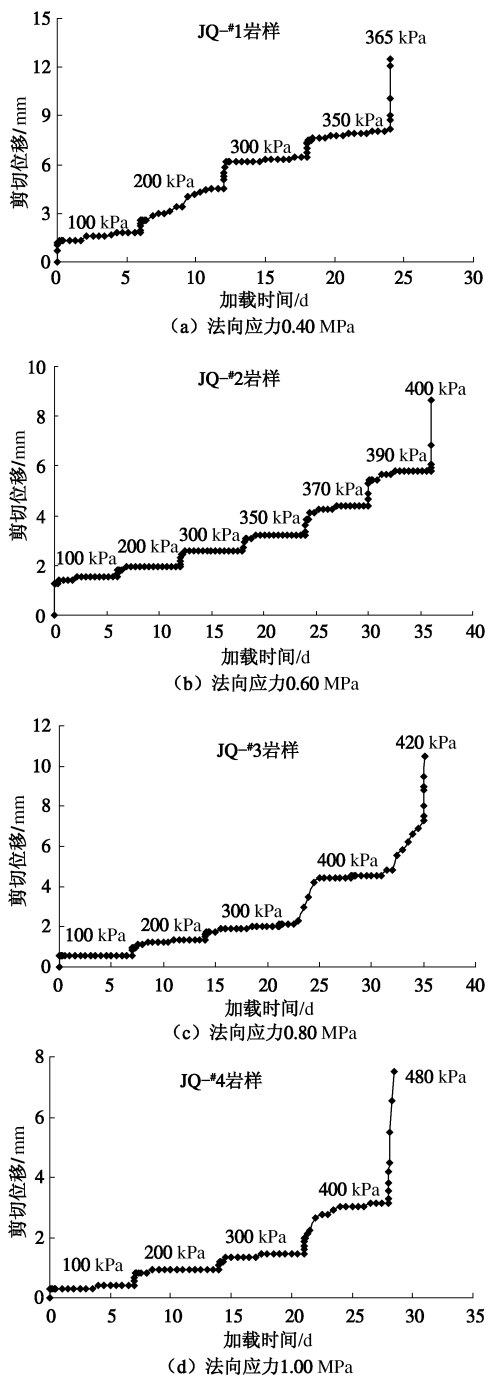


图 3 层间错动带剪切蠕变曲线

Fig. 3 Shear creep curves of interlayer shear belt

从图 3 中可以看出, 坝肩高边坡层间错动带岩体的剪切蠕变试验曲线具有如下特征:

(1)不同法向应力(0.40, 0.60, 0.80 和 1.00 MPa)作用下, 坝肩高边坡层间错动带岩体的剪切蠕变试验曲线可分为瞬时弹性变形阶段、衰减蠕变阶段、和稳态等速蠕变阶段; 当剪切应力大于长期剪切强度时, 层间错动带岩体表现出加速蠕变变形的特征, 从而发生蠕变破坏、且持续时间很短, 剪切破坏荷载分别为 365, 400, 420 和 480 kPa。

(2)法向应力恒定的情况下, 随着时间的增加, 当剪应力达到某一临界值时, 层间错动带岩体由初始剪切蠕变阶段过渡到稳定剪切蠕变阶段, 蠕变持续时间与剪切应力水平有关。

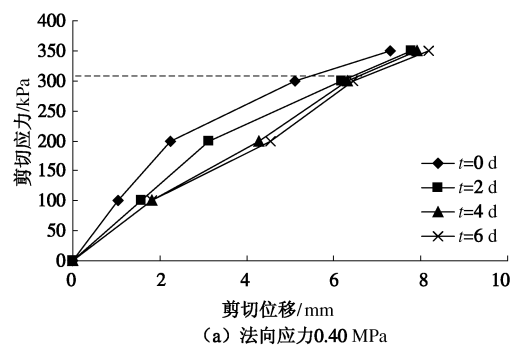
(3)层间错动带岩体的剪切蠕变特性与法向应力及剪应力水平具有明显的相关性, 随着法向应力的增加, 层间错动带岩体稳态蠕变变形量明显减少; 在法向应力恒定的情况下, 当开始施加某一级剪应力荷载时, 层间错动带岩体均存在明显的瞬时变形, 随着时间的增长, 同级剪应力荷载水平下, 错动带岩体的剪切变形会有较小程度的增加。

## 2 层间错动带剪切蠕变力学特性分析

### 2.1 错动带的长期剪切强度特性

层间错动带的长期剪切强度是由初始剪切强度向长期剪切强度逐渐衰减的。当剪应力水平小于长期剪切强度时, 层间错动带的变形主要表现为衰减蠕变和稳态等速蠕变; 当剪应力大于或等于长期剪切强度时, 层间错动带的变形表现为衰减蠕变、稳态等速蠕变以及加速蠕变 3 个阶段。因此, 确定层间错动带的长期剪切强度非常重要。

现基于图 3 所示的剪切蠕变试验曲线, 应用 Boltzmann 叠加原理进行叠加分析, 以 0, 2, 4 和 6 d 时间为参数, 绘制了法向应力 0.40, 0.60, 0.80 和 1.00 MPa 作用下剪切应力 - 剪切位移的等时曲线簇, 如图 4 所示。



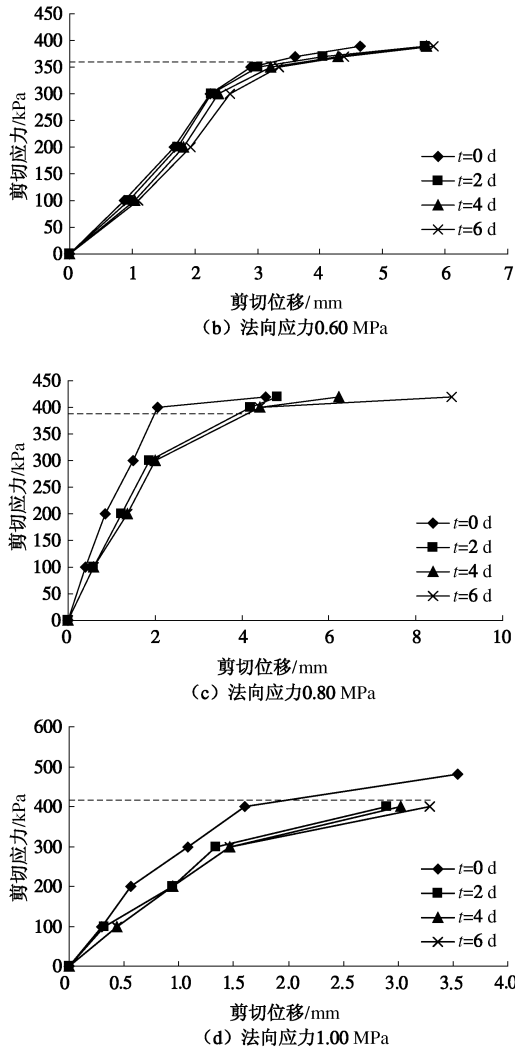


图4 层间错动带剪切蠕变等时簇曲线

Fig. 4 Isochronal curves of shear creep of interlayer shear belt

从图4中可以看出,法向应力0.40 MPa下的长期剪切强度为310 kPa,法向应力0.60 MPa下的长期剪切强度为365 kPa,法向应力0.80 MPa下的长期剪切强度为390 kPa,法向应力1.00 MPa下的长期剪切强度为405 kPa,此时的长期剪切强度即为层间错动带发生加速蠕变变形的临界剪应力,所对应的剪应变为临界蠕变剪应变。

对比不同法向应力下的临界剪应力可知,采用线性公式  $\sigma = a\tau + b$  拟合后,结果显示临界剪应力与法向应力存在图5所示关系。根据 Mohr-Coulomb 准则,认为岩体承载的最大剪切应力或者说抗剪强度  $\tau$  是由黏聚力  $c$  和内摩擦角共同决定,其中  $a$ ,  $b$  分别为内摩擦系数 ( $\tan \varphi$ ) 和黏聚力  $c$ 。结合拟合结果可知  $c = 0.255$  MPa,  $\varphi = 46.1^\circ$ , 该值可为层间错动带长期抗剪强度参数的确定提供参考。

2.2 错动带的加速蠕变特性分析

从图3所示层间错动带剪切蠕变曲线中可以看出,各试件在不同法向应力作用下,当所施加的剪切

应力水平接近或大于其长期剪切强度时,均发生了加速剪切蠕变,且历经剪切破坏的时间均较短,剪切变形均较大。以试件 JQ-#4 在法向应力 1.00 MPa 作用下、剪切应力水平达到 480 kPa 时所发生的加速剪切蠕变为例进行分析,其加速剪切蠕变曲线如图6所示。

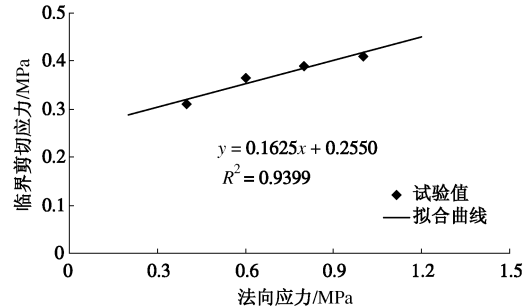


图5 临界剪应力与法向应力的相关关系

Fig. 5 Relationship between critical shear stress and normal stress

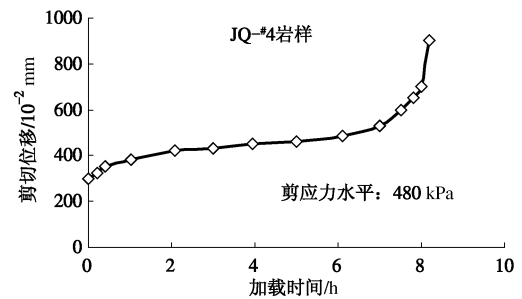


图6 法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带加速剪切蠕变曲线  
Fig. 6 Accelerated shear creep curve of interlayer shear belt under normal stress of 1.00 MPa

从图6中可以看出,在法向应力 1.00 MPa 作用下,当剪切应力水平达到 480 kPa 时,该加速蠕变曲线表现出3个明显的典型阶段,即衰减蠕变阶段、稳态等速蠕变阶段和加速蠕变阶段,整个加载变形至剪切损伤破坏的过程持续仅 8.25 h,持续时间相对较短。

岩体的蠕变速率对边坡工程的长期稳定性有着重要影响。在法向应力 1.00 MPa 作用下,剪应力水平为 480 kPa 时层间错动带的剪切蠕变速率-时间关系如图7所示。

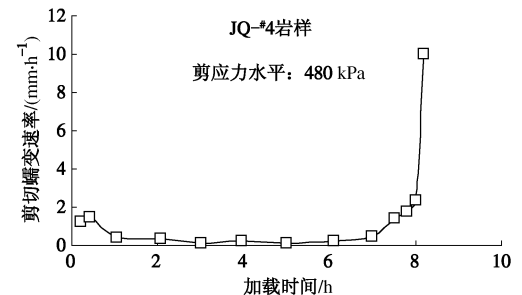


图7 法向应力 1.00 MPa 作用下剪应力水平 480 kPa 时层间错动带的剪切蠕变速率-时间关系

Fig. 7 Relationship between shear creep rate and time of interlayer shear belt under normal stress of 1.00 MPa and shear stress of 480 kPa

从图 7 中可以看出, 与坝肩高边坡岩体内部较硬岩石相比, 层间错动带的蠕变特性更加显著, 蠕变速率和蠕变变形量更大; 在不同的应力状态下, 层间错动带的蠕变特征差异显著。在法向应力 1.00 MPa 作用下, 当剪切应力水平达到 480 kPa 时, 该剪切蠕变破坏阶段的蠕变速率呈现出先减小、后持续稳定、再加速增大的过程。

### 3 层间错动带蠕变损伤本构模型研究

坝肩高边坡岩体深部层间错动带对于整个水电工程的长期安全性至关重要, 因此, 必须建立相应的层间错动带蠕变本构模型, 进而为进一步开展水电工程高边坡长期稳定性的分析与评价奠定基础。

#### 3.1 层间错动带的长期蠕变损伤演化规律

工程岩体在荷载长期作用下, 具有变形随时间而增大、力学参数随时间而降低的特性。相关试验研究成果已经证实, 岩体的强度、弹性模量、黏性系数等力学参数通常会随时间的增长而降低, 典型弹性参数逐渐损伤衰减过程的典型曲线<sup>[10-11]</sup>如图 8 所示。

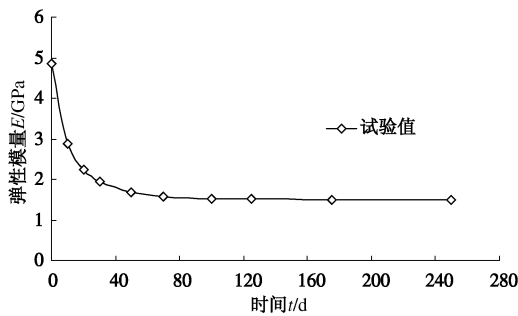


图 8 岩体弹性参数损伤衰减曲线

Fig. 8 Damage attenuation curve of rock elastic parameter

根据损伤力学理论, 损伤变量的定义主要有两种方法<sup>[12-13]</sup>: 一种是几何损伤中从结构有效承载面积出发定义的损伤变量; 另一种是能量损伤中按变形参数变化定义的损伤变量, 并且认为材料变形参数的“劣化”是造成材料损伤的主要因素。

根据文献[10]所研究的弹性参数损伤衰减规律(图 8 所示), 认为反映剪切模量劣化的损伤演化方程可用下式来表示:

$$D(t) = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} [1 - \exp(-\alpha t)] \quad (1)$$

并将任一流变参数  $A(t)$  随时间的劣化规律表示为

$$A(t) = A_0 (1 - D(t)) = A_0 \left[ 1 - \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} (1 - \exp(-\alpha t)) \right] \quad (2)$$

式中  $G_0$  为初始弹性模量;  $G_\infty$  为长期弹性模量;  $\alpha$  为与损伤程度相关的系数;  $D(t)$  和  $D_i$  为与时间相关的损伤变量;  $A_0$  为参数初始值。

岩石的剪切强度亦与时间密切相关, 岩石强度与时间呈负指数函数关系<sup>[3, 14]</sup>, 可用下式来表示

$$\tau(t) = (\tau_0 - \tau_\infty) \exp(-mt) + \tau_\infty \quad (3)$$

式中  $\tau(t)$  为对应的剪应力水平;  $\tau_0$  为瞬时剪切强度;  $\tau_\infty$  为时间趋向于无穷时的剪切强度, 近似于岩石的强度  $\tau_s$ , 定义为长期剪切强度;  $m$  为材料参数。

但是, 对于水电工程坝肩高边坡而言, 岩体内部层间错动带的强度特性与其材料的蠕变特性、内部损伤机制密切相关; 此外, 影响坝肩高边坡内部层间错动带蠕变变形特性的因素十分复杂, 除了错动带的接触状态、充填物性质、风化程度等因素, 还包括水岩耦合作用、开挖卸荷作用等外部环境条件。在上述复杂地质环境和外力因素的共同作用下, 坝肩高边坡层间错动带的剪切模量、剪切强度等随时间的延长而逐渐降低, 进而严重影响坝肩高边坡的长期稳定性。

因此, 为了综合考虑各种复杂因素对岩体层间错动带蠕变损伤变形特性的影响, 本文提出将这一蠕变损伤演化过程划分为两个部分: 一是环境因素影响下岩体力学特性“劣化”的损伤演化过程; 二是岩体加速蠕变引起的损伤演化过程。

第一部分损伤演化可通过岩体力学参数随时间的弱化规律来实现, 如式(1)~(3)所示; 第二部分损伤演化是基于能量耗散理论<sup>[15-17]</sup>, 利用岩体加速蠕变损伤引起的剪切蠕变应变定义错动带岩体的蠕变损伤演化方程来实现, 演化方程如下:

$$D_a = 1 - \exp \left[ -\beta \left| \gamma_c^2 - (\gamma^*)^2 \right|^{\frac{1}{n}} \right] \quad (4)$$

式中  $\beta$  为待定试验参数;  $\gamma$  为剪切蠕变应变,  $\gamma^*$  为加速蠕变的初始值;  $D_a$  为加速蠕变引起的损伤量;  $n$  为材料常数。

一维应力作用条件下, 错动带岩体的蠕变方程可用下式表示:

$$\gamma = f(t, \tau) \quad (5)$$

将层间错动带视为各向同性材料, 在加速蠕变过程中的损伤规律与加速蠕变位移密切相关, 认为当剪应力水平  $\tau$  大于或等于长期剪切强度  $\tau_\infty$  时, 得到的加速蠕变损伤引起的剪切蠕变方程为

$$\gamma_D = \frac{\gamma'_c}{\exp \left[ -\beta \left| \gamma^2 - (\gamma^*)^2 \right|^{\frac{1}{n}} \right]} \quad (\gamma \geq \gamma^*) \quad (6)$$

式中  $\gamma_D$  为错动带加速蠕变损伤引起的剪切蠕变应变;  $\gamma'_c$  为发生加速蠕变之前的衰减蠕变和稳态等速蠕

变之和。

### 3.2 剪切蠕变损伤本构模型的建立

一般来讲,蠕变模型只能描述衰减蠕变、稳态等速蠕变,例如开尔文模型、伯格斯模型、广义开尔文模型、西原模型等,无法描述岩体力学特性劣化过程和加速蠕变损伤过程。因此,本文以西原流变模型为基础,考虑层间错动带弹性参数随时间变化的损伤劣化效应  $D_t$ , 以及随非线性加速蠕变变化引起的蠕变损伤效应  $D_a$ , 提出了一个新的黏弹塑性蠕变损伤本构模型, 如图 9 所示。

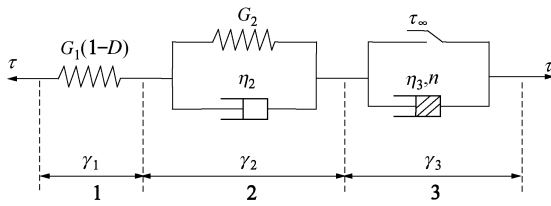


图 9 黏弹塑性蠕变损伤本构模型示意图

Fig. 9 Illustrations of modified viscoelastic-plastic creep-damage constitutive model

(1) 当  $\tau < \tau_\infty$ , 仅考虑蠕变参数随时间变化的损伤劣化效应  $D_t$ , 其蠕变损伤本构方程为

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (\tau < \tau_\infty), \quad (7)$$

式中,  $D_t$  为岩体力学参数随时间变化的损伤劣化效应,  $D_t$  由式 (1)、(2) 进行确定。

(2) 当  $\tau \geq \tau_\infty$  且  $\gamma < \gamma^*$  时, 同时考虑岩体弹性参数随时间变化的损伤劣化效应  $D_t$ , 则其蠕变损伤本构方程为

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\tau}{\eta_3} t \quad (\tau \geq \tau_\infty, \gamma < \gamma^*). \quad (8)$$

(3) 当  $\tau \geq \tau_\infty$  且  $\gamma \geq \gamma^*$ , 同时考虑岩体弹性参数随时间变化损伤劣化效应  $D_t$  和随加速蠕变变化的损伤劣化效应  $D_a$ , 并结合式 (6), 则其蠕变损伤本构方程为

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\tau}{\eta_3} t + \frac{\gamma'_c}{\exp\left[-\beta \left| \gamma^2 - (\gamma^*)^2 \right|^{\frac{1}{n}}\right]} \quad (\tau \geq \tau_\infty, \gamma \geq \gamma^*). \quad (9)$$

式 (9) 综合考虑了层间错动带随时间变化的损伤劣化效应和随加速蠕变变化的损伤劣化效应; 所建立的新的黏弹塑性蠕变损伤模型既可以反映错动带岩体力学参数弱化的瞬时弹性变形、衰减蠕变及稳态等速蠕变, 还可以描述高剪切应力下的蠕变损伤引起的加

速蠕变特性。

### 4 蠕变损伤模型的试验验证

为了验证所提出的坝肩高边坡层间错动带蠕变损伤本构模型的正确性与合理性, 现选取法向应力 1.00 MPa 作用下, 剪切应力为 480 kPa 时的蠕变试验成果进行分析。

根据图 6 所示的法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带加速剪切蠕变试验曲线, 可以得到法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带发生剪切蠕变破坏时的剪应力为  $\tau = 480 \text{ kPa} > \tau_\infty = 405 \text{ kPa}$ ; 根据法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带直剪试验结果, 确定层间错动带在法向应力 1.00 MPa 作用下的直剪强度  $\tau_0 = 700 \text{ kPa}$ ; 法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带发生剪切蠕变破坏时的剪应力所对应的剪应变为临界剪应变,  $\gamma^* = 485 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ; 将试验值代入式 (4)、(7) ~ (9), 进行蠕变损伤模型的试验验证。

具体验证过程如下:

(1) 对图 6 所示法向应力 1.00 MPa 作用下层间错动带非线性加速剪切蠕变试验曲线, 利用  $t=0$  时刻的瞬态蠕变值求出初始弹性模量  $G_1$ 。

(2) 通过稳态等速蠕变阶段 ( $t_1, t_2$ ) 时间段内的层间错动带剪切蠕变试验数据, 利用式 (8) 求解得到层间错动带蠕变损伤本构关系参数  $G_2, \eta_3$ 。

(3) 通过衰减蠕变阶段 ( $t_0, t_1$ ) 时间段内的层间错动带剪切蠕变试验数据, 利用式 (7) 求解得到层间错动带蠕变损伤本构关系参数  $\eta_2$ 。

(4) 最后通过加速蠕变阶段 ( $t_2, t_c$ ) 时间段内的层间错动带剪切蠕变试验数据, 利用式 (9) 求解得到层间错动带蠕变损伤本构关系控制加速蠕变特性的材料参数  $\beta, n$ 。

通过以上验证过程分析, 可以得到的蠕变损伤模型参数如表 1 所示; 同时得到了完整反映层间错动带 3 个蠕变阶段的拟合曲线, 并与常用的西原流变模型进行了对比分析, 如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, 所提出的蠕变损伤模型可以较好地反映坝肩高边坡层间错动带蠕变损伤的全过程。

表 1 层间错动带蠕变损伤模型参数

$G_1$ /GPa	$G_2$ /GPa	$\eta_2$ /(GPa·d)	$\eta_3$ /(GPa·d)	$\alpha$ /d <sup>-1</sup>	$n$	$\beta$
0.321	1.130	0.027	2	0.246	0.872	0.035

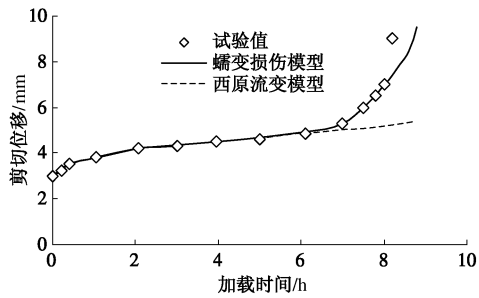


图 10 蠕变损伤模型数值拟合结果与试验结果对比

Fig. 10 Comparison between calculated and test results of creep damage model

## 5 结 论

(1)重大水利水电工程中的含层间错动带岩体存在具有普遍性,给工程的稳定性带来重大隐患。本文通过分析某水电工程坝肩高边坡深部层间错动带的剪切蠕变力学特性,发现错动带的剪切蠕变特性与法向应力及剪应力水平具有明显的相关性;随着法向应力的增加,错动带岩体的稳态蠕变变形量明显减少;在法向应力恒定的情况下,随着时间的增加,当剪应力达到某一临界值时,错动带岩体由初始剪切蠕变阶段过渡到稳定剪切蠕变阶段,而且蠕变持续时间与剪切应力水平有关。

(2)利用剪切应力-剪切应变等时曲线簇法得到了坝肩高边坡层间错动带岩体的长期剪切强度参数;研究发现当剪切应力大于长期剪切强度时,错动带表现出明显的加速蠕变变形特征,而且发生蠕变破坏的持续时间较短,蠕变速率呈现出先减小、后持续稳定、再加速增大的过程。

(3)综合考虑了高边坡层间错动带岩体随时间变化的损伤劣化效应和伴随加速蠕变变化的损伤演化效应,建立了完整反映坝肩高边坡层间错动带蠕变损伤全过程的蠕变损伤本构模型,并结合试验成果验证,证明所提出的模型既可以反映层间错动带岩体力学参数弱化的瞬时弹性变形、衰减蠕变、及稳态等速蠕变,还可以描述高剪切应力下的蠕变损伤引起的加速蠕变特性。

### 参考文献:

[1] 孙 钧. 岩石流变力学及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. (SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081 - 1106. (in Chinese))

[2] 丁秀丽, 刘 建, 刘雄贞. 三峡船闸区硬性结构面蠕变特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(4): 30 - 33.

(DING Xiu-li, LIU Jian, LIU Xiong-zhen. Experimental study on creep behaviors of hard structural plane in TGP's permanent lock regions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(4): 30 - 33. (in Chinese))

[3] 杨圣奇, 徐卫亚, 杨松林. 龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 895 - 903. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, YANG Song-lin. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan Hydropower Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 895 - 903. (in Chinese))

[4] 张治亮, 徐卫亚, 赵海斌, 等. 向家坝水电站含弱面砂岩剪切蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3693 - 3699. (ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, ZHAO Hai-bin, et al. Investigation on shear creep experiments of sandstone with weak plane in Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3693 - 3699. (in Chinese))

[5] 许东俊. 软弱岩体流变特性及长期强度测定法[J]. 岩土力学, 1980, 2(1): 37 - 50. (XU Dong-jun. The rheological behavior of the weak rock mass and the method of determining long-term strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 1980, 2(1): 37 - 50. (in Chinese))

[6] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 含层间错动带岩体的破坏模式及其剪切特性研究方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 129 - 136. (XU Ding-ping, FENG Xia-ting, CUI Yu-jun, et al. On failure mode and shear behavior of rock mass with interlayer staggered zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 129 - 136. (in Chinese))

[7] 伍国军, 陈卫忠, 曹俊杰, 等. 工程岩体非线性蠕变损伤力学模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1184 - 1192. (WU Guo-jun, CHEN Wei-zhong, CAO Jun-jie, et al. Nonlinear creep damage model of engineered rock and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1184 - 1192. (in Chinese))

[8] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 16 - 22. (LÜ Ai-zhong, DING Zhi-kun, JIAO Chun-mao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 16 - 22. (in Chinese))

[9] 张治亮, 徐卫亚, 王 伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 132 - 140. (ZHANG Zhi-liang,

- XU Wei-ya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in xiangjiaba hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 132 - 140. (in Chinese))
- [10] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(4): 732 - 740. (ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, ZHANG Jian-guo, et al. Variable parameters-based creep damage constitutive model and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(4): 732 - 740. (in Chinese))
- [11] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(3): 246 - 251. (XU Hong-fa. Time-dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, **16**(3): 246 - 251. (in Chinese))
- [12] 王贵君. 一种盐岩流变损伤模型[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 81 - 84. (WANG Gui-jun. A constitutive creep-damage model for saline rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S0): 81 - 84. (in Chinese))
- [13] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚. 基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(23): 4253 - 4257. (WEI Li-de, YANG Chun-he, XU Wei-ya. Study on creep damage constitutive model of salt rock based on mesomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(23): 4253 - 4257. (in Chinese))
- [14] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(11): 1602 - 1604. (YANG Chun-he, CHEN Feng, ZENG Yi-jin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(11): 1602 - 1604. (in Chinese))
- [16] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (in Chinese))
- [17] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (in Chinese))