

DOI: 10.11779/CJGE201912010

# 隐伏非贯通结构面剪切蠕变特性及本构模型研究

李任杰, 吉 锋\*, 冯文凯, 王东坡, 张津铭

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 结构面控制岩质边坡失稳的边界, 自然界中大量结构面是非完全贯通的, 且隐藏在斜坡内部, 非贯通结构面研究对于揭示斜坡启动破坏机理及稳定性具有重要意义。隐伏非贯通结构面的岩块取样困难且不能大量复制, 通过室内制作一种隐伏非贯通结构面模型, 在单轴压缩试验和剪切试验的基础上, 采用 YZJL-300 型岩石剪切流变仪, 对隐伏非贯通结构面岩体进行剪切蠕变试验, 并对蠕变特性进行研究。根据蠕变试验的阶段特征, 引入一个适用于结构面的非线性黏性加速元件和材料损伤变量, 建立一种非贯通结构面的剪切蠕变损伤本构模型, 并根据拉普拉斯变化推导三维剪切蠕变本构方程。利用 L-M 算法和全局优化法对所得的蠕变试验曲线进行辨识, 求解模型参数。经过辨识并对比试验结果和模型拟合结果, 新建立的本构模型能较好地反映非贯通结构面蠕变特性, 对揭示岩质斜坡的长期稳定性和时效演化有借鉴意义。

**关键词:** 隐伏非贯通结构面; 剪切蠕变试验; 加速元件; 蠕变损伤本构模型

**中图分类号:** TU451      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)12-2253-09

**作者简介:** 李任杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性及工程环境效应。E-mail: 1419923936@qq.com。

## Shear creep characteristics and constitutive model of hidden non-persistent joints

LI Ren-jie, JI Feng, FENG Wen-kai, WANG Dong-po, ZHANG Jin-ming

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The joints control the boundary of the rock slope instability. A large number of joints in the natural world are not completely persistent, and are hidden inside the slope. The study on the hidden non-persistent joints is of great significance for revealing the failure mechanism and stability of the slope. The rock specimens with natural hidden non-persistent joints are difficult to sample and cannot be replicated in large quantities. A model experiment on the rock mass with hidden non-persistent joints is made in laboratory, which is similar to the reality. Based on the uniaxial compression tests and direct shear tests, the shear creep tests and creep characteristics of rock mass with hidden non-persistent joints are carried out by using the YZJL-300 rock shear rheometer. According to the creep test results, based on the creep stage characteristics and previous researches on the creep constitutive model, a new constitutive model for the shear creep damage is established by introducing a non-linear viscous accelerating element and a material damage variable suitable for joints. Because the rock mass is in the three-dimensional stress condition under actual conditions, in order to be better applied to the actual engineering, the three-dimensional state of the constitutive model is generalized. The obtained creep test curve is identified by the L-M algorithm and global optimization method to solve the model parameters. By identifying and comparing the test results and model fitting results, the new constitutive model can better reflect the creep characteristics of rock mass.

**Key words:** hidden non-persistent joint; shear creep test; accelerating element; creep damage constitutive model

## 0 引言

自然界中, 岩体总是不连续的, 其破坏总是沿力学性质相对薄弱的结构面发生<sup>[1-2]</sup>, 结构面的存在对岩体稳定性在一定程度上起决定性作用<sup>[3]</sup>。结构面对岩体变形和强度性质产生影响, 进而制约工程设计、造价和施工<sup>[4]</sup>。然而, 大量工程失稳破坏案例表明, 其应力均未达到岩体峰值强度, 说明岩体存在时间效应和蠕变特性, 具有长期强度。在岩体的众多变形破坏

中, 剪切蠕变破坏是重要组成部分, 这种破坏多见于大型岩质边坡(滑坡)。这种岩质边坡(滑坡)的失稳破坏并不是瞬间造成的, 而是经过成年累月的变形叠加, 最终主控滑面(主控结构面)贯通造成滑坡失稳。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC1501003); 四川省科技计划资助项目(2018JY0471); 四川省青年科技创新研究团队项目(2017TD0018)

**收稿日期:** 2019-04-22

岩质边坡(滑坡)的主控结构面一旦贯通,即失稳或处于极限平衡状态。目前自然界多数岩质边坡(滑坡)并未失稳,处于非贯通阶段。因此,对于具有结构面尤其是隐伏非贯通结构面的剪切蠕变破坏研究十分必要,为揭示岩质边坡(滑坡)的蠕变特性提供一定参考。

为了对非贯通结构面岩体的力学性质进行研究,前人研究出多种模拟非贯通结构面方法。胡波等<sup>[4]</sup>在完整砂浆混凝土块侧缘预置结构面。其次有完整岩石进行切割模拟非贯通结构面,混凝土块体堆砌方法等<sup>[2]</sup>。很多学者对完整岩块和结构面岩体蠕变方面进行了大量的蠕变试验,并获得了一系列成果。Zhang 等<sup>[5]</sup>对巴顿标准结构面的蠕变特性进行研究,进一步证明了开尔文模型适用于低剪应力,Burgers 适用于高剪应力下蠕变特性的描述。Jia 等<sup>[6]</sup>对白鹤滩水电站未受干扰岩石的不连续面进行剪切蠕变试验研究,得出蠕变应变与剪应力之间呈指数型关系,稳速蠕变速率与剪应力之间呈指数型关系。张清照等<sup>[7]</sup>对规则齿形结构面的剪切蠕变特性研究,表明结构面在蠕变过程中,不存在严格意义的稳态蠕变,并改进 Burgers 模型描述贯通结构面的剪切蠕变特性。徐卫亚等<sup>[8-9]</sup>等提出一个非线性黏性元件与其它传统元件进行组合,描述了绿片岩的三轴蠕变特性。张治亮等<sup>[10]</sup>对已有的非线性元件进行改进并与开尔文模型进行组合,对含弱面砂岩的剪切蠕变特性进行描述。Asanov 等<sup>[11]</sup>通过对含结构面的盐岩在不同加载速率下的剪切蠕变特性进行研究,建立了适用于结构面变形的结构流变模型。Kemeny<sup>[12]</sup>提出一种断裂力学模型,借助 UDEC 软件对沿结构面岩桥的时间效应进行了模拟。Wu 等<sup>[13]</sup>提出七元件模型(NVPRM)对预置结构面的砂岩剪切蠕变特性研究。宋勇军等<sup>[14]</sup>以分数阶微积分建立的软体元件和幂函数黏塑性体为基础,与传统元件进行组合,建立一种描述蠕变 4 个阶段的黏弹塑性流变模型。康永刚等<sup>[15]</sup>对开尔文模型和黏塑性体模型进行改进,对岩石蠕变特性以分段函数形式进行表示。陈兴周等<sup>[16]</sup>以西原模型为基础,同时考虑损伤效应,建立一种能够反映蠕变损伤演化过程的本构方程。张强勇等<sup>[17]</sup>以 Burgers 为基础,同时考虑材料损伤演化,建立一种描述岩石蠕变特性的变参数蠕变损伤本构方程。熊良宵等<sup>[18]</sup>以所建立的六元件蠕变本构模型为基础,采用 FLAC<sup>3D</sup> 进行本构模型二次开发,结果表明六元件本构模型能较好描述岩石的黏弹塑性特性。Zhang 等<sup>[19]</sup>以 Nishihara 模型为基础,串联一个非线性剪切流变元件,对岩石加速蠕变过程进行较好的描述。目前对隐

伏非贯通性结构面或断续结构面的剪切蠕变特性研究甚少。

另外,前人在材料损伤力学方面做了大量研究,均认为材料在长期荷载下,材料的力学性质均会有所下降,力学参数与时间呈指数函数形式变化<sup>[13, 15-17]</sup>。张强勇等<sup>[17]</sup>对数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行二次开发,将损伤变量考虑进本构模型中每个元件,经过模拟计算,衰减和稳态阶段中,且考虑损伤变量的本构模型与实际试验曲线一致,考虑损伤变量的应变>不考虑损伤的应变。因此在进行本构模型的建立时,将材料的损伤程度考虑进模型的方法是与实际情况更加吻合的。

目前虽在蠕变方面做了大量的工作,但是多数也仅限于完整岩块方面的蠕变特性研究,对于非贯通结构面剪切蠕变方面,由于其复杂性,其研究仍欠缺。本次针对非贯通结构面剪切蠕变特性的复杂性,参考李银平等<sup>[2]</sup>学者文中所提利用云母片模拟结构面方法,进一步制作含隐伏非贯通结构面的试验模型,进行剪切试验及剪切蠕变试验,揭示非贯通结构面的剪切蠕变特性,以对岩体工程安全性评价具有理论和实践意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 方法的合理性

由于岩石中结构面分布的复杂性,取样十分困难,尤其保障非贯通结构面的一致性难以操作,因此本次试验采用室内模拟结构面的方法进行相应研究。室内模拟结构面即可看作一种将野外的大型结构面“简化”为室内的模型试验。岩质斜坡中结构面隐伏于岩体内部,而结构面周围岩体仍是完整的岩桥,这种组合称为非贯通结构面,如图 1。此类非贯通结构面的取样困难且在野外多为大型非贯通结构面,试验难以进行,因此采取室内模拟结构面的研究方法具有一定的合理性和必要性。

### 1.2 样品制备

此次试验所制作样品均为隐伏非贯通结构面砂浆混凝土块。单轴压缩、直剪试验和剪切蠕变试验均采取同样的材料和配比。试验所需材料主要为水、水泥、标准砂、云母片、减水剂、早强剂等。首先对标准混凝土试模(100 mm×100 mm×100 mm)进行一定程度上的改进,通过利用白色油漆笔在模具内壁四周距底部 50 mm 处画一直线将模具分为上下两部分,以便后续结构面的准确放置。配合比按照水:水泥:标准砂=3:8:8,减水剂与早强剂均按水泥质量的 1% 配

制。最后, 浇筑混凝土, 具体步骤: ①改进模具; ②分层浇筑模型下半部分; ③将方形云母片放置于模型中央位置, 使方形云母片四周与模具的四壁平行; ④分层浇筑模型上半部分; ⑤待其固结 24 h 后拆模, 放入水中养护 20 d, 工艺制作流程详见图 2。按照上述方法, 分别制作 50 mm×50 mm, 60 mm×60 mm, 70 mm×70 mm, 80 mm×80 mm 预置结构面混凝土块各 6 个, 共 4 组。每组 3 个用于直剪试验, 3 个用于剪切蠕变试验。

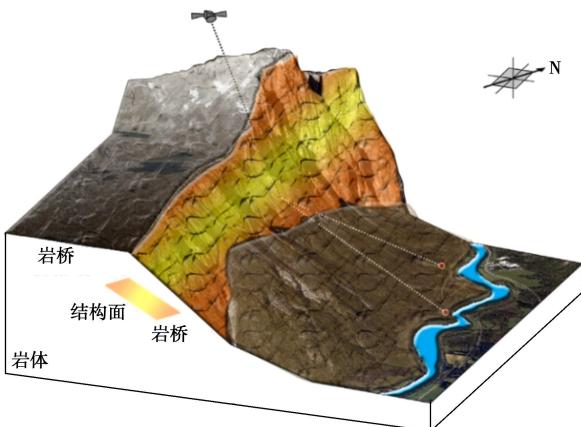


图 1 室内模型来源及应用

Fig. 1 Source and application of indoor model

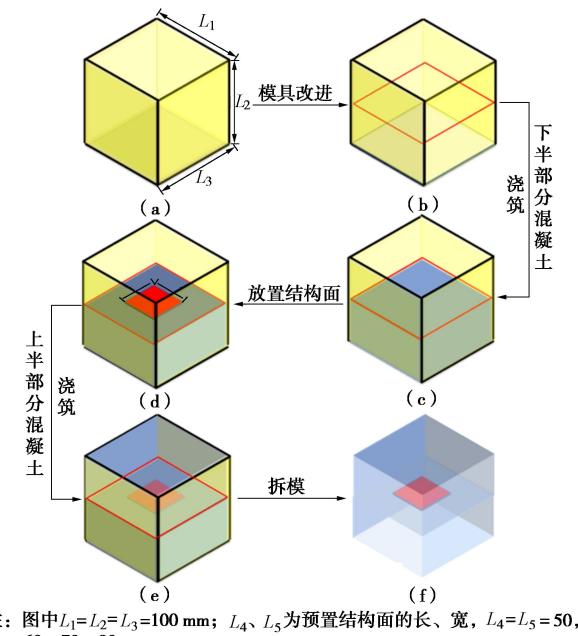


图 2 模型制作流程

Fig. 2 Preparation process of model

在剪切试验中, 云母片的力学强度相比较于水泥砂浆而言甚低, 岩桥力学参数  $\varphi_0=52^\circ$ ,  $c_0=7.11\text{ MPa}$ 。节理参数  $\varphi_f=33.18^\circ$ ,  $c_f=0.02\text{ MPa}$ 。结合实际工程, 文稿采用水泥砂浆块体模拟岩桥、采用云母片模拟节

理, 综合模拟具有非贯通的硬性平直结构面。

### 1.3 试验设计

目前室内剪切蠕变试验的实验方法有两种: 一种为在一组试样上施加相同的正应力, 在不同试样上施加不同剪应力直至试样破坏; 另外一种为陈宗基先生提出的相对省时的试验方法, 即在一组试样上施加不同正应力, 在不同试样上逐级增加剪切荷载直至剪坏<sup>[20]</sup>。对比上述两者方法, 最终决定采用第二种试验方法进行岩体蠕变特性的研究。

此次剪切蠕变试验主要研究隐伏非贯通结构面剪切蠕变特性。剪切蠕变试验需在单轴压缩、直剪试验的基础上进行。因此, 首先通过单轴压缩试验测定岩石的单轴抗压强度 (UCS)。通过单轴压缩试验, 获得水泥砂浆试件平均单轴抗压强度为 56 MPa, 泊松比为 0.22, 弹性模量为 12.56 GPa。再将用于直剪试验的 3 个试样分别在 5%, 10%, 15% UCS 下分别测定相应的抗剪强度。最后, 以抗剪强度的 50% 作为剪切蠕变试验的一级剪应力, 之后剪切荷载逐级增加至 60%, 70%, 80%, 90%, 95%, 100%, 每级剪切荷载持续 48 h, 直至试样破坏。每级剪切荷载大小详见表 1。表 1 中不同结构面连通率为放置不同大小的云母片, 预置结构面的放置均严格按照模型制作流程, 因预置的结构面为面型结构面, 预置结构面连通率  $k=\text{结构面预置面积}/\text{模具横截面面积}=(L_4 \cdot L_5)/(L_1 \cdot L_3)$ 。

### 1.4 试验仪器

本次剪切蠕变试验仪器为地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研发的 YZJL-300 型岩石剪切流变仪, 见图 3。整个试验系统主要由垂直加载装置、水平加载装置、垂直荷载传感器、水平荷载传感器、垂直位移传感器、水平位移传感器、数据采集装置组成。位移传感器精度为 0.01 mm 和压力传感器的精度为 0.01 kN, 均能达到试验所需。

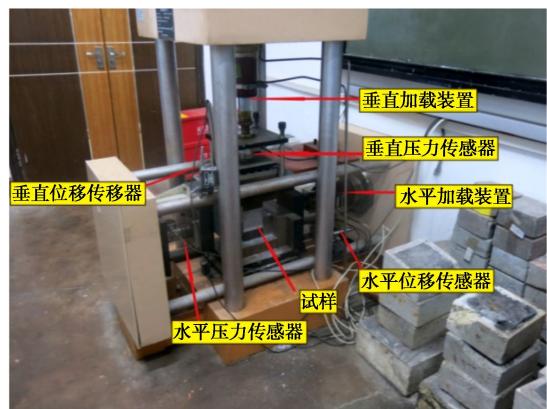


图 3 剪切蠕变试验装置

Fig. 3 Shear creep testing device

表 1 非贯通结构面剪切蠕变试验参数表

Table 1 List of shear creep test parameters for non-persistent joints

编号	连通率 $k$	正应力 $\sigma/\text{MPa}$	1 <sup>st</sup> $\tau/\text{MPa}$	2 <sup>nd</sup> $\tau/\text{MPa}$	3 <sup>rd</sup> $\tau/\text{MPa}$	4 <sup>th</sup> $\tau/\text{MPa}$	5 <sup>th</sup> $\tau/\text{MPa}$	6 <sup>th</sup> $\tau/\text{MPa}$	7 <sup>th</sup> $\tau/\text{MPa}$
1	0.25	2.80	2.70	3.24	3.78				
2		5.60	4.00	4.80	5.60	6.40			
3		8.40	5.50	6.60	7.70	8.80	9.90	10.45	1.10
4	0.36	2.80	2.40	2.88	3.36	3.84			
5		5.60	3.65	4.38	5.11	5.84	6.57		
6		8.40	4.70	5.64	6.58	7.52			
7	0.49	2.80	2.10	2.52	2.94	3.36			
8		5.60	3.25	3.90	4.55	5.20	5.85		
9		8.40	4.25	5.10	5.95	6.80	7.65		
10	0.64	2.80	1.70	2.04	2.38	2.72	3.16		
11		5.60	2.80	3.36	3.92	4.48	5.04		
12		8.40	3.75	4.50	5.25	6.00	6.75		

## 2 剪切-蠕变试验结果及分析

在岩石压缩、直剪试验基础上, 进行剪切蠕变试验。试验中出现了蠕变过程的 4 阶段, 即①瞬时应变、②衰减蠕变、③稳速蠕变和④加速蠕变 4 个阶段。限于文章篇幅, 选取其中 3 组 3 种不同正应力下剪切蠕变试验结果进行绘图并进行结果分析。

由图 4 可知, 增加剪应力时, 岩体出现了明显的瞬时应变的现象。每个试样加载一级剪切荷载时瞬时位移较大, 可能为放置试样时, 试样与试验仪器之间未完全紧密接触所致。

蠕变试验中减速蠕变过程和稳速蠕变过程在试验过程中十分明显。由剪切蠕变位移曲线和剪切位移阶段曲线可知, 瞬时应变变形后, 随时间的增长, 曲线的斜率逐渐减小至零或一个近乎“稳定值(指稳速蠕变速率)”, 此过程持续时间也相对较短, 称之为减速蠕变过程。当蠕变速率降低为某一确定的非零值时, 岩体蠕变开始进入稳速蠕变过程, 此过程蠕变速率恒定。

根据已有的研究, 剪应力不易控制, 导致加速蠕变过程在蠕变试验中较难观察到。此次试验中观察到了加速蠕变过程, 剪切蠕变数据及图像反映出, 加速蠕变阶段中, 加速蠕变速率比较迅速, 导致破坏较快且多为下一级剪切荷载施加后短时间内甚至在剪应力未达到预定剪应力时就已发生破坏。选取一组具加速蠕变过程的试验进行加速蠕变特性的研究。图 4(e)~(f) 反映出, 当岩体加速蠕变发生前, 稳速蠕变阶段的蠕变速率会相应增大。

试样在每级剪切荷载作用下, 均有瞬时位移较后期蠕变位移大的现象。经分析, 每级瞬时应变位移在上一级剪切位移较稳定的情况下, 加载下一级剪切荷载的短暂时间相当于在岩体中加载动荷载。加载动荷载的同时, 岩块中结构面破裂处的内摩擦力变为动摩擦力, 在动摩擦力下, 岩体欲发生移动则需要较小的

应力; 每一级的动荷载加载完毕后, 在岩体上所施加的荷载于结构面处形成的摩擦力变为了静摩擦力, 静摩擦力较动摩擦力大, 此时物体欲发生移动, 则需要更大的外部荷载, 因此剪切蠕变位移相对瞬时应变位移较小。

## 3 剪切蠕变损伤本构模型的建立

### 3.1 损伤变量的引入

与工程有关的岩体在持续荷载的作用下, 岩体强度、剪切模量、黏性系数等相关的岩体力学参数在荷载强度未达到岩体长期强度时会下降至一定值<sup>[12]</sup>或荷载强度超过岩体强度时, 岩体发生稳速或不稳定蠕变, 最终导致力学参数下降至接近于零的值。因此在建立本构方程时在模型中考虑损伤变量是符合岩体蠕变的实际变化过程的。陈兴周等<sup>[16]</sup>、张强勇等<sup>[17]</sup>对岩体流变参数的损伤劣化效应以数学表达式的方式进行表达。材料损伤变量  $D_t$  演化方程为

$$D(t) = D_t = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} (1 - e^{-\alpha t}) \quad . \quad (1)$$

式中  $E_0$  为初始弹性模量;  $E_\infty$  为长期弹性模量;  $\alpha$  为与材料损伤程度相关的系数;  $t$  为时间。任意的流变参数  $A_t$  (包括岩体强度、弹模、黏滞系数) 的损伤劣化演化方程为

$$A(t) = A_t = A_0 (1 - D_t) \quad . \quad (2)$$

### 3.2 一维剪切蠕变损伤本构方程的建立

蠕变试验曲线体现了蠕变的瞬时应变、衰减蠕变、稳速蠕变、加速蠕变阶段。因此, 本构模型中应包含弹性元件、黏弹性元件、黏塑性元件。

一般的剪切蠕变本构模型无法反映加速蠕变阶段且无法描述流变过程中流变参数随时间的损伤演化过程。因此, 本文以熊良宵等<sup>[18]</sup>提出的黏弹性本构模型为基础, 引入反映结构面剪切特性的蠕变非线性黏壶加速元件, 同时考虑流变参数随时间的损伤劣化效应, 提出一个新的非线性剪切蠕变损伤本构模型, 如图 5。

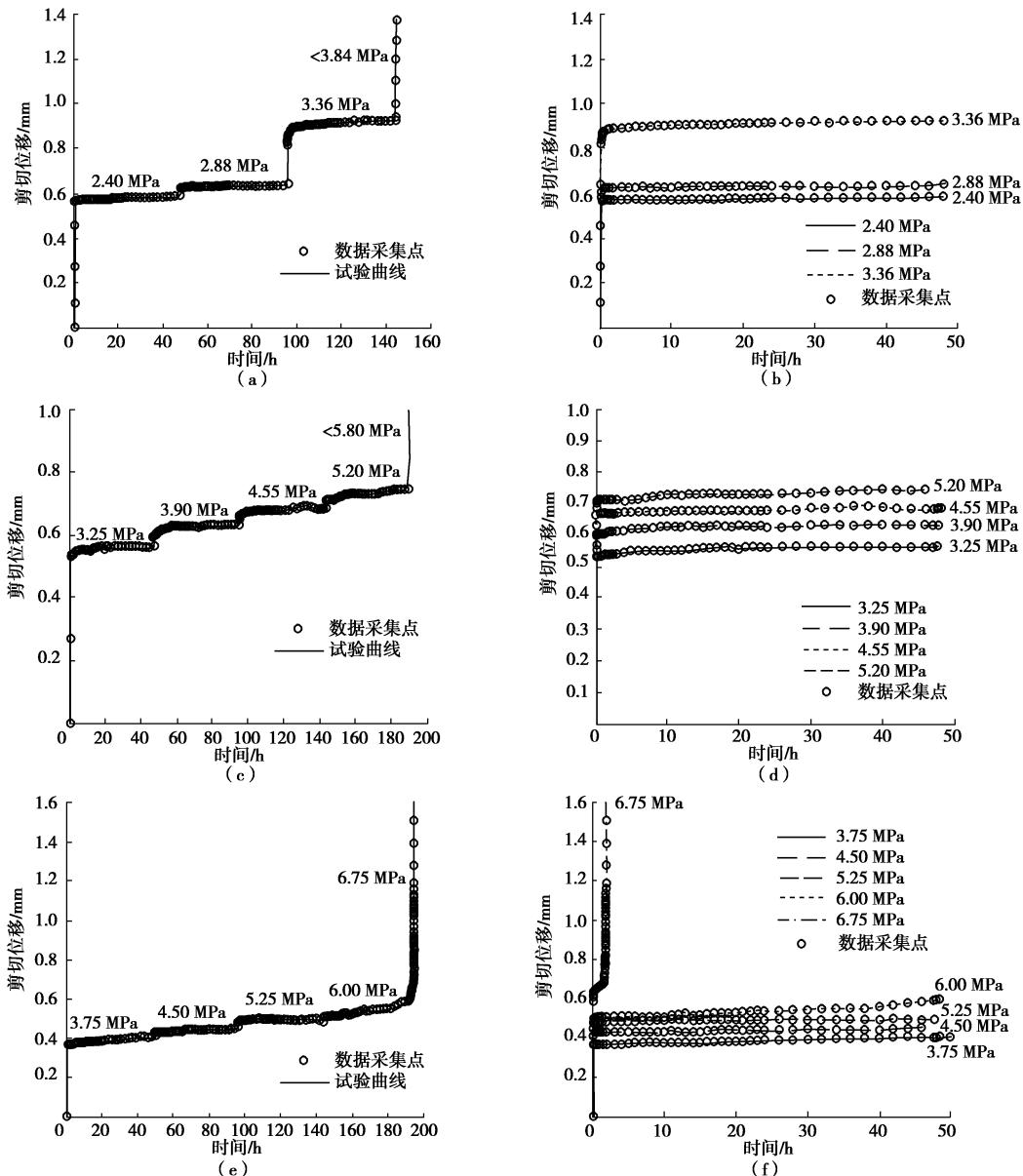


图4 剪切蠕变试验应力-应变-时间曲线

Fig. 4 Stress-strain-time curves of shear creep tests

根据张清照等<sup>[7, 19]</sup>的研究提出非线性黏性元件的本构方程如下:

$$\tau_4 = \eta_3 \frac{\dot{\gamma}_4}{nt^{n-1}} \quad . \quad (4)$$

通过引入损伤变量  $D_t$  后, 改进后的元件的损伤本构方程为

$$\tau_4 = \eta_3 (1 - D_t) \frac{\dot{\gamma}_4}{nt^{n-1}} \quad . \quad (5)$$

由元件串联时总应变等于各部分应变之和, 通过对式(3)~(5)进行计算并积分推导出本文所使用的本构方程为

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1(1 - D_t)} + \frac{\tau}{G_1(1 - D_t)} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{G_2}{\eta_1} t \right) \right] +$$

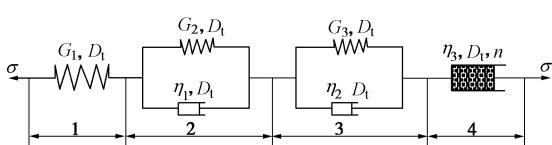


图5 改进的剪切蠕变损伤本构模型

Fig. 5 Improved shear creep damage constitutive model

根据图5中元件之间的串并联关系, 可得各个部分之间的应力应变关系为

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4, \\ \gamma &= \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4, \\ \tau_1 &= G_1(1 - D_t) \cdot \gamma_1, \\ \tau_2 &= G_2(1 - D_t) \cdot \gamma_2 + \eta_1(1 - D_t) \cdot \dot{\gamma}_2, \\ \tau_3 &= G_3(1 - D_t) \cdot \gamma_3 + \eta_2(1 - D_t) \cdot \dot{\gamma}_3. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\tau}{G_3(1-D_t)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_3}{\eta_3} t\right) \right] + \frac{\tau}{\eta_3(1-D_t)} t^n \quad (6)$$

式中  $G_1, G_2, G_3$  为初始剪切模量;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  为初始黏滞系数;  $D_t$  与时间相关的损伤变量;  $\tau$  为剪应力;  $\gamma$  为应变;  $\dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3, \dot{\gamma}_4$  分别为  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  的一阶导数;  $n$  为流变指数。

根据上式(6)的表达式, 第一项为与时间无关的瞬时变形, 第二项和第三项为开尔文体所产生的趋稳蠕变, 第四项为与时间  $t$  和流变指数  $n$  有关的稳速及加速蠕变, 即当  $n \leq 1$  时, 整个模型可体现出稳速蠕变过程, 而不能体现加速蠕变过程, 当  $n > 1$  时, 模型可体现出加速蠕变过程, 见图 6。

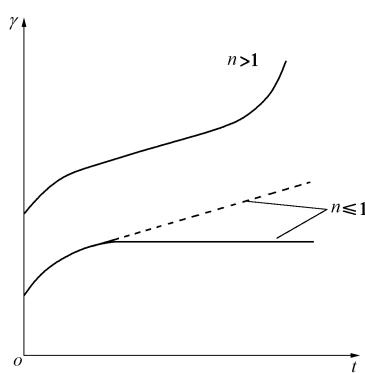


图 6 剪切蠕变损伤本构模型变形曲线

Fig. 6 Deformation curves of shear creep damage constitutive model

### 3.3 剪切蠕变损伤本构方程三维状态的推广

上述一维剪切蠕变损伤本构方程适用于对精度要求不高且能简化为平面问题的岩体工程中。现代岩体工程逐渐向岩体深处发展, 不可避免遇到高地应力等复杂的三维应力地区, 使得一维条件下所推导的蠕变本构方程不宜使用。因此将一维条件下的蠕变本构方程推导至三维应力条件下十分必要。

一维剪切蠕变损伤本构模型可以分解为一个弹性体, 两个 Kelvin 体, 一个非线性黏塑性体。在三维应力状态下, 蠕变损伤本构方程的总应变用张量形式可表述为

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma}_1 + \boldsymbol{\gamma}_2 + \boldsymbol{\gamma}_3 + \boldsymbol{\gamma}_4 \quad (7)$$

式中, 在本节中  $\boldsymbol{\gamma}_1, \boldsymbol{\gamma}_2, \boldsymbol{\gamma}_3, \boldsymbol{\gamma}_4$  分别为三维应力状态下本构模型各部分的偏应变张量

据广义胡克定律, 弹性体在三维状态下本构关系<sup>[21-24]</sup>如下(不考虑材料损伤变量):

$$\begin{cases} e_{ij} = (1/2G) \cdot s_{ij}, \\ \varepsilon_{ii} = (1/3K) \cdot \sigma_{ii} \end{cases} \quad (8)$$

则弹性体在三维应力状态下的应变即可表示为

$$\boldsymbol{\gamma}_1 = e_{ij}^e = \frac{1}{2G_1} s_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_{ii} \delta_{ij} \quad (9)$$

式中  $e_{ij}$  和  $s_{ij}$  分别为应变偏张量和应力偏张量;  $\varepsilon_{ii}$  和

$\sigma_{ii}$  分别为应变张量和应力张量第一不变量;  $G(G_1)$  和  $K(K_1)$  在本节分别为三维应力状态下(弹性体)剪切模量和(弹性体)体积模量;  $\sigma_m \delta_{ij}$  为球应力张量;  $e_{ii}^e$  为弹性体应变。

根据文献[22], 非线性黏壶元件的三维本构关系如下(不考虑材料损伤变量):

$$\boldsymbol{\gamma}_4 = e_{ij}^v = (t^n / 2\eta_4) s_{ij} \quad (10)$$

式中,  $\eta$  在本节中表示为黏性剪切系数,  $e_{ij}^v$  为黏壶元件的应变。

根据文献[21, 23]中所提及的 Kelvin 体经过拉普拉斯变换后, 应变张量与应力张量的关系如下(不考虑材料损伤变量):

$$e_{ij}^k = \frac{1}{2(G + \eta s)} s_{ij} = \frac{1}{2G} \frac{G/\eta}{((G/\eta) + s)} s_{ij} \quad (11)$$

上式(11)经过拉普拉斯逆变换后, 得到应变张量与应力张量形式为

$$e_{ij}^k = \frac{1}{2G} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G}{\eta} t\right) \right] s_{ij} \quad (12)$$

根据逆变换后所得的 Kelvin 体的本构关系, 本构模型中第二部分( $e_{ij}^{k1}$ )及第三部分( $e_{ij}^{k2}$ )的 Kelvin 体的应变张量及应力张量之间关系即可表达为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\gamma}_2 &= e_{ij}^{k1} = \frac{1}{2G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] s_{ij}, \\ \boldsymbol{\gamma}_3 &= e_{ij}^{k2} = \frac{1}{2G_3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_3}{\eta_3} t\right) \right] s_{ij}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $s$  为拉普拉斯变换空间复变量, 由叠加原理可知

$$\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma}_1 + \boldsymbol{\gamma}_2 + \boldsymbol{\gamma}_3 + \boldsymbol{\gamma}_4 = e_{ij}^e + e_{ij}^{k1} + e_{ij}^{k2} + e_{ij}^v \quad (14)$$

三维状态下含非贯通结构面岩体的剪切蠕变损伤本构模型为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\gamma} = e_{ij} &= \frac{1}{2G_1(1-D_t)} s_{ij} + \frac{1}{3K(1-D_t)} \sigma_{ii} \delta_{ij} + \\ &\quad \frac{1}{2G_2(1-D_t)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] s_{ij} + \\ &\quad \frac{1}{2G_3(1-D_t)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_3}{\eta_3} t\right) \right] s_{ij} + \\ &\quad \frac{t^n}{2\eta_4(1-D_t)} s_{ij} \quad (15) \end{aligned}$$

## 4 蠕变损伤本构模型辨识

采用数学优化软件 1stOpt 进行模型辨识, 基于其内置的麦夸特法的 L-M 算法和通用全局优化法对所建立的一维蠕变损伤本构模型参数进行拟合。

通过对<sup>#4, #8, #12</sup>试样蠕变数据进行拟合, 观察试验数据及拟合所得的曲线, 二者的相关性较高, 得出相关参数, 见表 2。

表2 剪切蠕变损伤本构模型参数一览表

Table 2 List of shear creep damage constitutive model parameters

编 号	剪应力 $\tau/\text{MPa}$	$G_1$ $(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_2$ $(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_3$ $(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\eta_1$ $(\text{MPa} \cdot \text{h} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\eta_2$ $(\text{MPa} \cdot \text{h} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\eta_3$ $(\text{MPa} \cdot \text{h} \cdot \text{mm}^{-1})$	$n$	$D_t$	$R^2$
4	2.40	$1.36 \times 10^{17}$	11.54	7.22	0.42	0.26	7755.95	1.00	0.05	0.982
	2.88	7.57	375.84	220.82	23.97	2.24	901.03	0.30	0.35	0.978
	3.36	5.23	166.40	23.07	37.57	0.17	46.94	0.13	$2.75 \times 10^{-10}$	0.999
8	3.25	243522.73	9.17	173.56	0.15	1641.03	305638.65	0.59	0.34	0.986
	3.90	8.32	180.40	101.82	1203.89	2.62	94564.03	0.80	0.16	0.972
	4.55	24.47	807.75	427.75	17267.87	4.87	48137.05	0.55	0.71	0.955
	5.20	7.56	237.73	141.27	11293.36	6711.43	225.71	$3.20 \times 10^{-15}$	$7.07 \times 10^{-8}$	0.961
12	3.75	112206.50	291.42	24.95	6.14	4812.92	12.27	$1.23 \times 10^{-18}$	0.13	0.999
	4.50	11.32	1269.18	99.53	274.77	9380.02	205.90	$3.31 \times 10^{-14}$	0.02	0.943
	5.25	72.66	6398.80	2966.32	559.67	13078.24	1581.94	$3.41 \times 10^{-14}$	0.84	0.965
	6.00	27.30	1566.75	$6.56 \times 10^{-6}$	37.53	8357.03	813.25	$2.33 \times 10^{-10}$	0.54	0.974
	6.75	11.16	149.69	2522934.34	16.18	4.21	$1.49 \times 10^8$	26.62	$1.40 \times 10^{-13}$	0.961

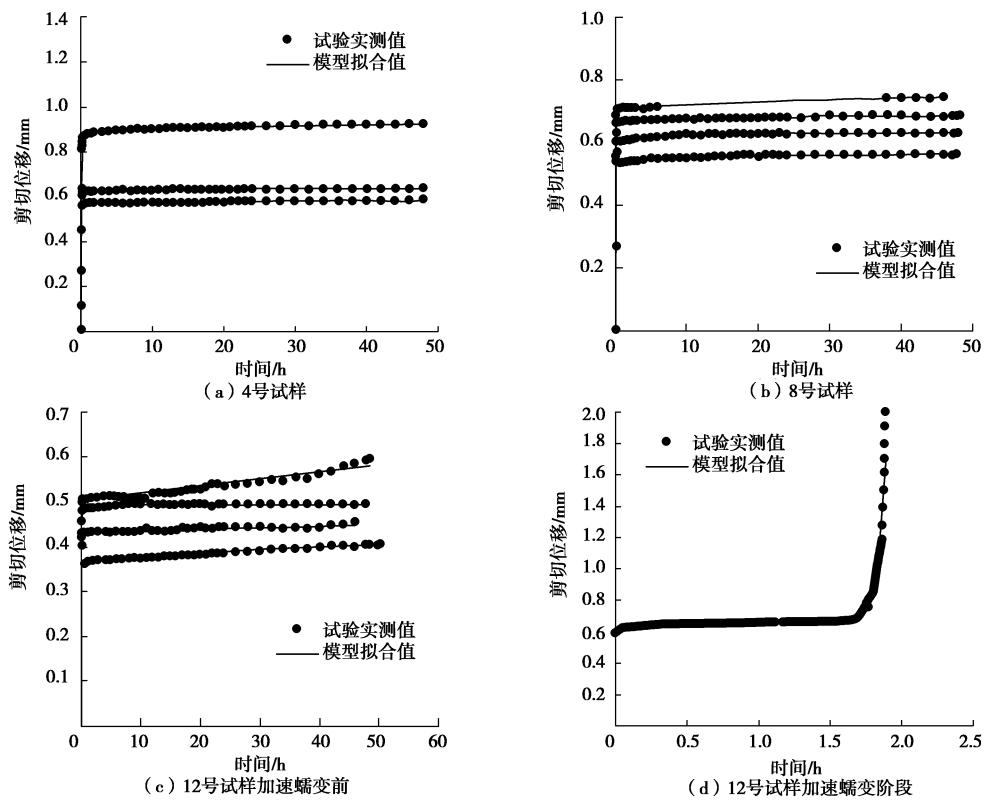


图7 试验实测值与拟合曲线对比图

Fig. 7 Comparison between experimental measured values and fitted curves

通过分析, #4, #8, #12 试样体现出明显的加速蠕变特征。采用#12 试样第四级剪应力阶段的加速蠕变数据对损伤本构模型进行辨识。经过辨识, 试验数据与所拟合的曲线具有较高的拟合度。图7给出了实际值和模型拟合曲线的对比图。

综上, 该模型能较好反映隐伏非贯通结构面模型的蠕变特性, 尤其对瞬时应变、衰减蠕变、稳速蠕变

阶段的辨识效果好, 对加速蠕变阶段的辨识效果略有偏差, 但整体上效果较好, 与试验实测值的变化趋势相同, 可信度较高。

## 5 结论

通过非贯通结构面剪切蠕变试验可得出以下结论:

(1) 提出一种制作隐伏非贯通结构面的方法。经剪切蠕变试验, 结果表明试验效果较好, 试样制样方法值得借鉴。

(2) 隐伏非贯通结构面蠕变过程体现为瞬时应变、衰减蠕变、稳速蠕变和加速蠕变过程。

(3) 引入一种描述结构面加速蠕变的非线性黏滞元件和岩体损伤变量, 建立了一种非贯通结构面一维剪切蠕变损伤本构模型。当流变参数  $n \leq 1$ , 体现了稳态蠕变过程, 当  $n > 1$ , 模型体现出加速蠕变过程。该模型能较好地反映非贯通结构面瞬时应变、衰减蠕变、稳速蠕变和加速蠕变过程。

(4) 在一维剪切蠕变损伤本构模型的基础上推导的三维状态模型更加符合自然条件下节理岩体常处于复杂的三维应力状态的实际。

(5) 获得的非贯通结构面剪切蠕变特性的认识, 可为研究岩质边坡(滑坡)的蠕滑演变过程和失稳判据提供一定依据。

## 参考文献:

- [1] SINGHAL B, GUPTA R. Applied hydrogeology of fractured rocks[M]. Dordrecht: Springer, 1999: 13 - 35.
- [2] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 120 - 124. (LI Yin-ping, WANG Yuan-han, CHEN Long-zhu, et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 120 - 124. (in Chinese))
- [3] 张成良, 刘磊, 王超. 高等岩石力学及工程应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016: 55 - 66. (ZHANG Cheng-liang, LIU Lei, WANG Chao. Advanced rock mechanics and engineering applications[M]. Changsha: Central South University Press, 2016: 55 - 66. (in Chinese))
- [4] 胡波, 张楠, 刘顺桂, 等. 节理对岩体强度变形特性影响的模型实验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1133 - 1138. (HU Bo, ZHANG Nan, LIU Shun-gui, et al. Contrastive model test for joint influence on strength and deformation of rock masses[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1133 - 1138. (in Chinese))
- [5] ZHANG Qing-zhao, SHEN Ming-rong, JIANG Bo-an, et al. Creep behavior of rocks with rough surfaces[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2016, 28(9): 1 - 10.
- [6] 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.
- [7] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面的剪切蠕变特性及本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 127 - 132. (ZHANG Qing-zhao, SHEN Ming-rong, DI Wen-qi. Study on the shear creep characteristics and constitutive model of rock mass discontinuity[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 40(7): 127 - 132. (in Chinese))
- [8] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693 - 698. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, XIE Shou-qi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693 - 698. (in Chinese))
- [9] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531 - 537. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531 - 537. (in Chinese))
- [10] 张治亮, 徐卫亚, 王如宾, 等. 含弱面砂岩非线性黏弹性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2634 - 2639. (ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Ru-bing, et al. Study of nonlinear viscoelastic-plastic rheological model of sandstone with weak plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2634 - 2639. (in Chinese))
- [11] ASANOV V A, PAN'KOV I L. Deformation of salt rock joints in time[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(4): 355 - 359.
- [12] KEMENY J. Time-dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 35 - 46.
- [13] WU L Z, LI B, HUANG R Q, et al. Experimental study and modeling of shear rheology in sandstone with non-persistent joints[J]. Engineering Geology, 2017, 222: 201 - 211.
- [14] 宋勇军, 雷胜友, 韩铁林. 一种新的岩石非线性黏弹性流变模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2076 - 2080. (SONG Yong-jun, LEI Sheng-you, HAN Tie-lin. A new nonlinear viscoelastic-plastic rheological model for rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2076 - 2080. (in Chinese))
- [15] 康永刚, 张秀娥. 一种改进的岩石蠕变本构模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1049 - 1055. (KANG Yong-gang, ZHANG Xiu-e. A modified constitutive model for rock creep[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1049 - 1055. (in Chinese))

- ZHANG Xiu-e. An improved constitutive model for rock creep[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(4): 1049 – 1055. (in Chinese))
- [16] 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. (CHEN Xing-zhou, LI Jian-lin, CHAI Jun-rui, et al. Shear creep characteristics and constitutive model for interlayer shearbelt of high abutment slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1675 – 1682. (in Chinese))
- [17] 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 – 739. (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 – 739. (in Chinese))
- [18] 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. (XIONG Liang-xiao, LI Tian-bin, YANG Chang-bin, 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. (in Chinese))
- [19] ZHANG Q Z, SHEN M R, DING W Q. The shear creep characteristics of a green schist weak structural marble surface[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2012, **22**(9): 697 – 704.
- [20] 肖树芳, 杨淑碧, 佴磊, 等. 岩体力学[M]. 1 版. 北京: 地质出版社, 2016: 21 – 33. (XIAO Shu-fang, YANG Shu-bi, ER Lei, et al. Rock mass mechanics[M]. 1st ed. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 21 – 33. (in Chinese))
- [21] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 19 – 24. (WANG Zhi-yin, LI Yun-peng. Rheological theory of rock mass and its numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008: 19 – 24. (in Chinese))
- [22] 薛永涛. 参数非定常的软岩非线性黏弹性流变本构模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (XUE Yong-tao. Study on nonlinear visco-elastic-plastic rheological model of soft rock with unstable parameters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [23] 史宝宁. 凝灰质粉砂岩力学特性试验及蠕变本构模型研究[D]. 成都: 西华大学, 2017. (SHI Bao-ning. Experimental study on mechanical propertiesand creep constitutive model of tuffaceous siltstone[D]. Chengdu: Xihua University, 2017. (in Chinese))
- [24] 王登科. 含瓦斯煤岩本构模型与失稳规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (WANG Deng-ke. A thesis submitted to Chongqing University in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of engineering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))