

DOI: 10.11779/CJGE20221556

隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡剪切蠕变特征及稳定性研究

宋 洋¹, 马旭琪^{*1}, 赵常青², 谢志辉², 王富成², 牛 凯¹

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中交三公局第一工程有限公司, 北京 101304)

摘要: 针对隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡滑移机理复杂这一关键科学问题。设计一种隐伏非贯通软弱夹层缩尺制备方法, 开展考虑夹层埋深、岩层倾角、含水率因素影响下岩体剪切蠕变特性试验。引入多参数岩体渐变损伤变量, 分阶段建立剪切蠕变损伤本构模型, 并通过相似模拟试验验证模型的合理性, 分析此类边坡的稳定性。研究表明: ①隐伏非贯通含软弱夹层岩体随夹层埋深增加、倾角减小、含水率减小而稳定性升高, 反之稳定性降低, 且夹层含水率对岩体稳定性影响最大, 埋深影响相对较小; ②考虑多参数渐变损伤本构模型能够反映隐伏非贯通软弱夹层岩体剪切蠕变全过程, 且加速蠕变阶段拟合效果优于西原模型; ③隐伏非贯通软弱夹层缩尺制备方法较为合理, 所推剪切蠕变本构模型能够较好拟合边坡蠕变滑移各阶段情况, 边坡滑移呈坡脚剪胀、后缘拉裂的整体性滑移, 对隐伏非贯通含软弱夹层岩体蠕变滑移具有参考意义。

关键词: 岩质边坡; 隐伏非贯通软弱夹层; 含水率; 剪切蠕变; 相似模拟

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)04-0755-09

作者简介: 宋 洋(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程方面的教学和科研工作。E-mail: lgdsongyang@163.com。

Shear creep characteristics and stability of rock slopes with concealed noninterpenetrated weak interlayer

SONG Yang¹, MA Xuqi¹, ZHAO Changqing², XIE Zhihui², WANG Fucheng², NIU Kai¹

(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. The First Engineering Co., Ltd.,

CCCC Third Highway Engineering Bureau, Beijing 101304, China)

Abstract: This study aims to address the key scientific problem of the complex slip mechanism of rock slopes with concealed noninterpenetrated weak interlayer. A scaled preparation method for a concealed noninterpenetrated weak interlayer is designed, and the shear creep characteristics of a rock mass under the influences of the burial depth of interlayer, dip angle of rock and water content are tested. The variable of gradual damage of the multiparameter rock mass is introduced, and the constitutive model for shear creep damage is established in stages. The rationality of the model is verified through the similar simulation experiments, and the stability of this kind of slope is analyzed. The research shows that: (1) The stability of the rock mass with a concealed noninterpenetrated weak interlayer increases as the burial depth of the interlayer increases, the dip angle and water content decrease, the stability otherwise decreases, the water content of the interlayer has the greatest influences on the stability of the rock mass, and the burial depth has a relatively small influence. (2) Considering that the multiparameter gradual damage constitutive model can reflect the whole process of the shear creep of rock masses with concealed nonpenetrated weak interlayer, the fitting effects of the accelerated creep stage are better than those of the Nishihara model. (3) The scaled preparation method for the concealed noninterpenetrated weak interlayers is more reasonable. The constitutive model for shear creep can better fit the creep slip of the slope at each stage. The slope slip shows the overall slip of the shear expansion of the slope toe and trailing edge tension, which has reference significance for the creep slip of concealed noninterpenetrated rock masses with weak interlayers.

Key words: rock slope; concealed nonpenetrated weak interlayer; water content; shear creep; analogy simulation

0 引言

岩质边坡在形成的过程中往往会产生软弱夹层,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974146, 52174078); 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0042)

收稿日期: 2022-12-28

*通信作者 (E-mail: 17361602709@163.com)

在降雨、地震等外部因素作用下边坡极易沿力学性质相对薄弱的结构面产生滑坡等破坏, 软弱夹层结构面一定程度上决定着岩体的整体稳定性^[1-2]。大量工程实例表明软弱结构面大多都具有显著的时效性, 岩体破坏时应力并未达到岩体的极限强度, 而是经过时间效应累积突破长期强度破坏。剪切蠕变破坏主要发生在大型岩质边坡中, 其边坡滑动都不是瞬间破坏, 而是经过长期的变形积累, 内部软弱结构面贯通造成滑坡失稳破坏^[3-4]。自然界中, 大多数软弱夹层处于岩体内部且表现为非贯通状态, 其滑移变形机理亟待深入研究。

对于非贯通结构面的研究, 前人已经开展了大量工作并取得相关成果。Zhang 等^[5]研究发现规则锯齿结构面在蠕变过程中表现为非稳态, 用改进 Burgers 模型呈现此类结构面的蠕变特性。张治亮等^[6]对含砂岩软弱结构面进行研究, 通过改进非线性元件和开尔文模型组合表征蠕变特性。Wu 等^[7]提出 NVPRM 模型对预制结构面的砂岩进行了研究。熊良宵等^[8]通过 FLAC^{3D} 的二次本构开发功能验证了其建立的六元件模型对于岩石黏弹性蠕变特性的有效性。陈兴周等^[9]在西元模型的基础上考虑损伤效应, 建立了一种岩石损伤蠕变特性本构。Zhang 等^[10]考虑了非线性剪切流变的影响, 以 Nishihara 为原型进行串联, 较好的反映了岩石加速蠕变的细观特性。李任杰等^[11]通过云母片模拟软弱结构面, 推导了此类结构面的蠕变特性本构模型。此外, 前人对岩体长期荷载作用下的岩体损伤变形机制展开了相关的研究。王建明等^[12]从断裂力学的单裂隙附加应变能增量和损伤应变能量释放思路出发, 推导了断续裂隙细观损伤张量表达式。王中强等^[13]采用辛普生积分推导了混凝土能量损伤公式。张强勇等^[14]以 FLAC^{3D} 软件为平台, 引入损伤变量到本构模型的修正, 通过数值模拟验证了损伤变量对岩体长期强度的作用。杨圣奇等^[15]将损伤力学引入岩石流变模型中, 推导了两阶段岩体损伤演化方程, 说明了考虑损伤变量的必要性。

目前对于隐伏非贯通软弱夹层结构面的剪切蠕变特性影响因素的研究还不充分, 且大多采用相似材料模拟软弱结构面。本次以工程现场软弱夹层为样本设计缩尺含软弱夹层岩体制备方法, 考虑夹层埋藏深度、倾角和含水率因素分析隐伏非贯通软弱夹层岩体剪切蠕变特性, 考虑多参数渐变损伤分阶段推导适用于此类岩体的剪切蠕变本构模型, 通过相似模拟试验验证本构模型正确性, 并阐明隐伏非贯通含软弱夹层边坡稳定性。

1 剪切蠕变试验

1.1 试验设备

本次试验设备采用辽宁工程技术大学土木工程实验室 TAW2000 三轴试验仪剪切试验系统, 见图 1。通过电脑控制不同法向应力, 推动剪切上盘进行剪切蠕变试验。



图 1 剪切蠕变试验设备

Fig. 1 Shear creep test equipments

1.2 样本制备

在隐伏型岩质边坡中, 对于含软弱结构面的地段确定其蠕变滑移特性十分不易。因此, 采用室内模拟的方法加以推测验证具有合理性和必要性。

此次试验设计以混凝土试块模拟硬质岩层, 取现场软弱夹层样本制备试块中软弱夹层结构面。经基础力学试验测得软弱夹层 $c=3.24 \text{ MPa}$, $\varphi=29^\circ$ 。试验配置硬岩材料主要为石英砂: 重晶石粉: 水泥: 石膏: 水=3:3:2:2:2.1, 再加入 1% 甘油。模具采用三联标准混凝土试模 (100 mm×100 mm×100 mm), 考虑软弱夹层在岩体内厚度, 在相似原理基础上自制软弱夹层预制双面贯通模具 (50 mm×50 mm×2 mm)。试块制备见图 2。

具体步骤主要包括①底部浇筑: 将调制好的硬岩砂浆导入模具并分层振捣浇筑 3 cm; ②软弱夹层制作: 分别按照固定级配的原岩样本进行不同含水率的配置, 将调制好的夹层倒入双面贯通的模具中如图 2 (b); ③软弱夹层在试块内定位: 在模具内通过测量确定软弱夹层角度及位置, 采用薄铁片将预制夹层移入模具, 待夹层初步凝固取出双面贯通模具; ④上层浇筑: 待取出模具后进行顶部硬岩的浇筑, 浇筑时四周进行充分振捣, 顶部完全覆盖后整体振捣确保密实性; ⑤试块在模具内静置 24 h 后脱模, 将试件于水中养护 21 d。分别以岩层倾角和软弱夹层含水率为变量进行影响因素试验, 每个试件制备 4 个, 共计 64 个试件。

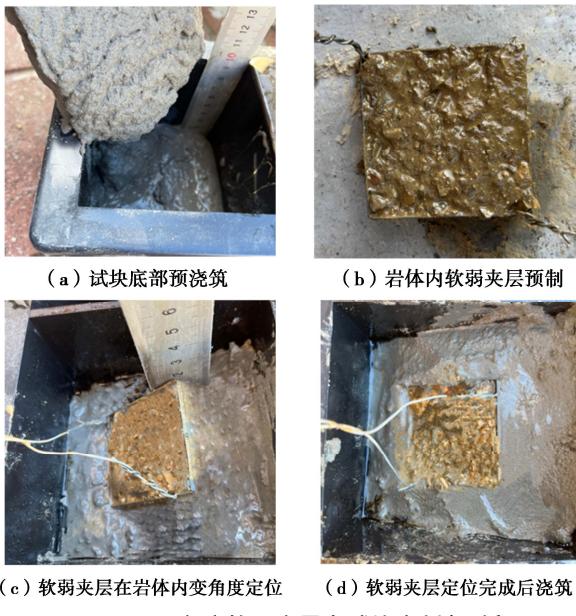


图 2 不同角度软弱夹层在试块内制备过程

Fig. 2 Preparation process of weak interlayer with different angles in test block

1.3 试验设计

目前室内剪切蠕变试验加载方式主要分为两种,一种是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^[16]。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。

为研究软弱夹层不同含水率和岩层倾角对隐伏式非贯通岩质边坡的剪切蠕变破坏特性,以软弱夹层含水率 15%, 18%, 21%, 23%, 岩层倾角 0°, 35°, 50°, 65° 进行正交试验,考虑软弱夹层所处岩层深度,以不同法相应力进行试验。为明确含软弱夹层岩体试块受力特征,单独浇筑一组纯硬岩配比试件作为对照组,测得该组试件在法相应力 2.4, 2.9, 3.4 MPa 作用下,最大剪应力分别为 10.86, 13.69, 15.84 MPa。试验组切向应力根据室内直剪试验确定不同参变量下的最大剪应力,再根据最大剪应力的 20%, 40%, 60%, 80%, 90%, 100% 进行逐级加载,每次加载时间持续 48 h,最后一级试样破坏即停止加载。不同试件加载工况如表 1。

2 剪切蠕变结果分析

通过室内直剪试验确定每组试块最大剪应力,在上述不同工况下进行剪切-蠕变试验。试验数据分析可得,试验中出现瞬时应变、衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变阶段。在不同条件下的剪切蠕变破坏情况均有明显差异,本文仅取含水率为 15% 和软弱夹层倾角为 0° 两种情况进行分析说明。

表 1 隐伏式含软弱夹层边坡室内模拟加载工况参数表

Table 1 Indoor simulation loading condition parameters of concealed slope with weak interlayer

编号	含水率	夹层倾角/(°)	法相应力/MPa	最大剪应力/MPa
1		0	2.40	5.46
2	15%	35	2.90	5.98
3		50	3.40	6.26
4		65	3.90	6.39
5		0	2.40	5.12
6		35	2.90	5.32
7		50	3.40	5.42
8		65	3.90	5.89
9		0	2.40	5.09
10	18%	35	2.90	5.12
11		50	3.40	5.32
12		65	3.90	5.48
13		0	2.40	4.86
14		35	2.90	4.91
15		50	3.40	4.96
16		65	3.90	5.09

2.1 破坏裂纹情况

随着试验的持续进行,最后试块破坏时的外部特征展现出不同的情况。图 3 中以内部软弱夹层含水率为 15% 时不同倾角下的破坏情况进行总结。图 3 (a) 中软弱夹层倾角是 0°, 即试块剪断时沿其夹层角度受力,从图中可以看出剪断裂纹呈水平状态和岩层倾角保持一致且裂纹上部完全开裂下部有较小的细微裂纹。图 3 (b) 中软弱夹层倾角为 35°, 试件剪断破坏时裂纹出现较小的倾角约 30° 向上发展,且后部展开一条向下扩展的裂纹并未完全贯通。图 3 (c) 中软弱夹层倾角 50°, 试件破坏时展现出两条明显向上倾斜的裂纹角度较图 3 (b) 中更加大。图 3 (d) 中软弱夹层倾角为 65°, 试件破坏过程中展现两条裂纹,上部裂纹倾角约 60°、下部倾角趋于水平且软弱夹层外有突出倾向。

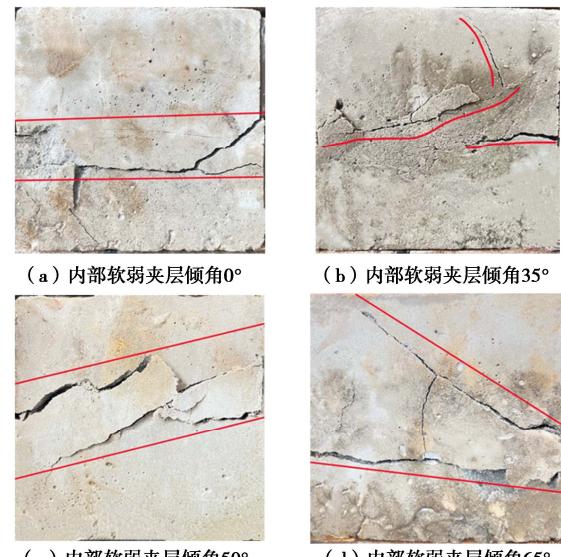


图 3 内部软弱夹层含水率 18% 情况下层倾角不同破坏面裂纹

Fig. 3 Cracks on failure surface with different interlayer dip angles of internal weak interlayer under water content of 18%

从以上试验现象可以发现, 同一含水率情况下不同软弱夹层岩层倾角的岩体在剪切蠕变破坏时主要破坏区域在岩体软弱夹层处, 且软弱夹层上节理面相对于更加容易滑动开裂。这是由于岩体在受力过程中岩体产生一定弯矩上部岩体有向下倾倒趋势, 在软弱夹层节理面上部力学承载相对较快, 在同一弯矩作用效果相同时下部需要更大的力。即岩体试件剪切蠕变破坏可以符合实际含软弱夹层岩质边坡滑移情况。

2.2 破坏断面情况

为确保养护 21 d 后软弱夹层内部含水率的变化情况, 需要对剪切破坏后的软弱夹层进行含水率测定, 对应不同含水率下的剪断面如图 4。从图 4 中可以发现经过养护后的软弱夹层还是保持着原本的含水率, 水分的流失在误差预计范围之内, 可以达到试验的目的。从各断面破坏后的形态特征可以发现, 试样在剪切蠕变的过程中主要承力部位是硬岩部分, 内部软弱夹层在受力过程中逐步压缩, 内部结构在外力的作用下重组, 在无法承载外力后内部产生黏性变形, 剪断时软弱夹层断面结构变得松散极不稳定。

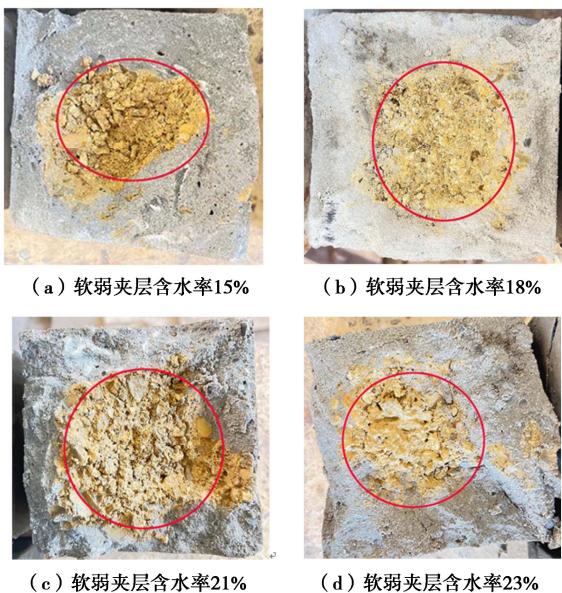


图 4 不同含水率下剪切蠕变剪断面图

Fig. 4 Shear creep shear section under different water contents

2.3 剪切-蠕变影响因素分析

(1) 同一含水率情况下

为研究软弱夹层在岩体内倾角对整体剪切蠕变破坏的影响, 本节选用软弱夹层含水率为 15% 时的不同情况进行分析。

该含水率下采用分五级加载的方式进行剪切蠕变试验, 通过图 5 可以发现在荷载初步加载时即产生约 0.4 mm 的位移, 在后续加载过程中均出现瞬时位移较大之后趋于平缓的现象, 这是由于在加载过程中在极短的时间内相当于对其加入动荷载, 在动荷载加入时其岩体内部软弱夹层内摩擦力转化为动摩擦力,

在动摩擦力作用下岩体要发生滑动相对需要较小的应力, 内部软弱夹层突然受力压缩外部表现为位移突然增加, 在受力稳定后, 动摩擦力再次转化为静摩擦力, 岩体产生位移变化再次需要更大的应力, 同时外部硬岩应力重新分布稳定, 整体曲线显示出瞬时增大之后趋于稳定状态, 在稳定过程中产生的位移则很小, 曲线趋于平缓^[17]。

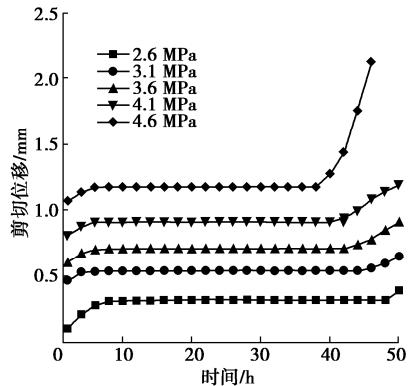


图 5 含水率 15% 岩层倾角 50° 蠕变特性曲线

Fig. 5 Creep characteristic curves of rock stratum with water content of 15 % and dip angle of 50 °

在图 6 中对不同岩层倾角下试验结果对比发现, 在相同情况下岩体内软弱夹层的倾角变化随角度的增加岩体剪切蠕变滑移位移减小, 这是由于其内部软弱夹层剪切面的减小导致的。不同倾角的软弱夹层受剪切面依次减小, 外部硬岩厚度增加岩体趋于更加稳定, 即在相同荷载下剪切位移更小。这也说明在隐伏式含软弱夹层边坡中, 软弱夹层和山体硬岩平行时由于降雨等原因导致上部荷载增加时, 沿软弱夹层滑动的危险性更高, 软弱夹层和硬岩产生相对角度时岩体边坡相对稳定。

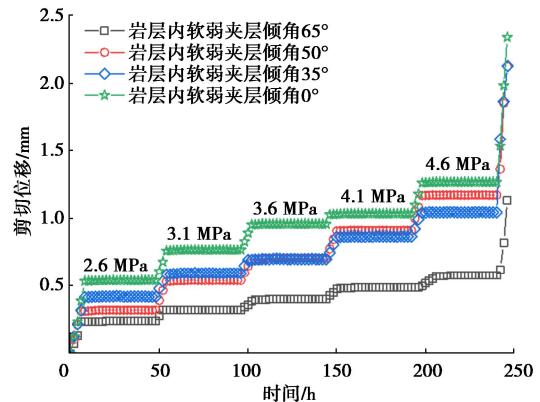


图 6 内部软弱夹层含水率 15% 不同岩层倾角剪切蠕变位移曲线

Fig. 6 Shear creep displacement curves of different rock dip angles of internal weak interlayer with water content of 15 %

在实际施工过程中对硬岩和软弱夹层平行的顺层边坡治理时应相对于其他更加着重考虑岩层倾角问题, 并进行支护设计。

(2) 同一岩层倾角情况下

为研究软弱夹层含水率对边坡整体稳定的影响, 以最危险岩层倾角 0° 进行研究。从图 7 中可以发现, 随着含水率的增加试块在剪切蠕变试验过程中所需要的最大荷载明显减小, 且各级荷载增加时岩体剪切位移变化明显, 说明含水率相对于岩层倾角对含软弱夹层边坡滑移破坏影响程度更大。这是由于随着含水率的增加其内部软弱夹层逐渐失去承载能力, 其内部静摩擦力转化为动摩擦所需要力更小, 在试块外部受力过程中内部软弱夹层由于含水率的不同对外产生不同的渗透力, 随含水率增加外部岩体受力后对内部压力增加内部软弱夹层产生向外的力, 促进了岩体的破坏。

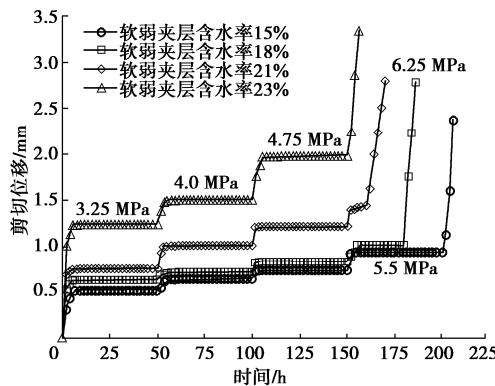


图 7 内部软弱夹层倾角 0° 下不同含水率剪切蠕变位移

Fig. 7 Shear creep displacement of different water contents under inclination angle of 0° of internal weak interlayer

在实际边坡中, 由于降雨导致内部软弱夹层软化含水率增加, 岩体对其应力增加的同时软弱夹层内部也产生静水压力, 导致降雨后一段时间不稳定岩质边坡容易产生蠕变滑移, 最终导致山体滑坡等灾害。

(3) 蠕变速率影响分析

以正应力 2.4 MPa 下岩层试件剪切蠕变状况进行分析含软弱夹层试件在剪应力作用下的蠕变速率变化情况。本文取软弱夹层含水量正常和饱和情况下一级加载蠕变速率情况进行分析, 如图 8, 9。

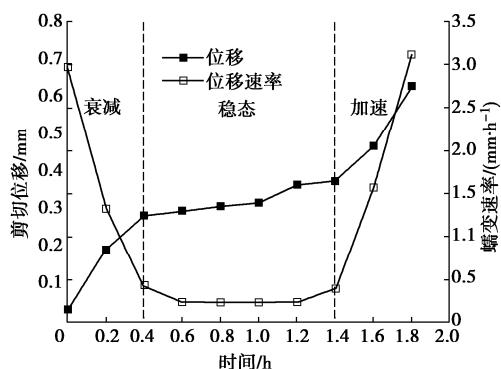


图 8 含水率 15% (正常) 蠕变速率-位移关系

Fig. 8 Creep rate-displacement relationship under water content of 15% (normal)

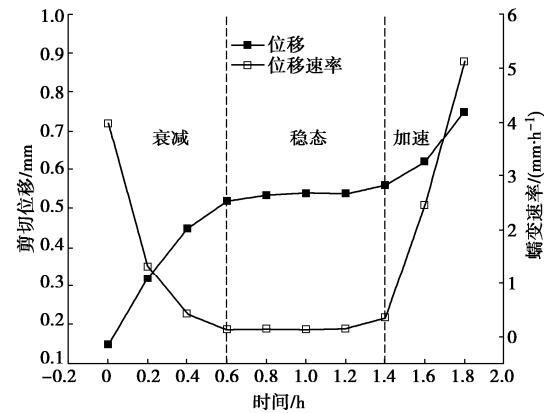


图 9 含水率 23% (饱和) 蠕变速率-位移关系

Fig. 9 Creep rate-displacement relationship under water content of 23% (saturated)

由图 8, 9 可得含软弱夹层岩石在软弱夹层含水率不同剪切蠕变试验过程中各个工况下均表现为衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段后随着时间的增长而破裂。相对应的时间-蠕变速率曲线在初始阶段有一定速率并逐步减小在稳态阶段速率变得相对稳定, 在蠕变加速阶段速率增加迅速。

3 多参数渐变损伤剪切蠕变本构模型

3.1 多参数损伤变量引入

实际工程中的岩体在持续荷载作用下岩体的剪切模量、强度、黏性系数等相关的岩体力学参数在其受力荷载未达到岩体长期强度时会下降部分值^[18], 相关研究已证实其过程中损伤衰减过程的作用存在。根据损伤力学理论, 损伤变量主要从结构有效承载面积和能量损伤中按变形参数变化两方面定义, 并指出材料变形参数的劣化是材料损伤的主要因素。根据陈兴周等^[19]提出的材料损伤衰减规律, 认为剪切模量的损伤演化可以用下式表达:

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

式中: E_0 为初始弹性模量; E_∞ 为任意时刻弹性模量; α 为与材料损伤程度相关的系数; t 为时间。

由此可推导任意时刻流变参数损伤为

$$A(t) = A_0 (1 - D_t) = A_0 \left[\frac{E_0 e^{-\alpha t} + E_\infty (1 - e^{-\alpha t})}{E_0} \right] \quad (2)$$

式中: A_0 表示材料初始值。

可得能量损伤和黏性损伤分别为

$$E(t) = E_0 (1 - D_t) = E_0 e^{-\alpha t} + E_\infty (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

$$\eta(t) = \eta_0 (1 - D_t) = \eta_0 \frac{E_0 e^{-\alpha t} + E_\infty (1 - e^{-\alpha t})}{E_0} \quad (4)$$

式中: η_0 为黏性参数。

岩石的剪切强度和时间的相关关系为

$$\tau(t) = (\tau_0 - \tau_\infty) e^{-mt} + \tau_\infty \quad (5)$$

式中: $\tau(t)$ 表示水平剪应力; τ_0 为瞬时剪切强度; τ_∞ 为任意时间(极大)的剪切强度, 接近于岩石强度; m 为材料参数。

3.2 损伤条件判别

在综合考虑 3 个主应力的影响下, 以等效应变定义材料的损伤阈值。定义岩体随蠕变的进行, 计损伤应变 ε_e , 阈值应变 ε_t 。由弹性力学可知 $\varepsilon^3 - J_1 \varepsilon^2 + J_2 \varepsilon - J_3 = 0$ 的 3 个根 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 可表示 3 个主应变。经过数学计算可得

$$\varepsilon_e = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} = \sqrt{J_1^2 - 2J_2} \quad (6)$$

式中: $J_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$;

$$J_2 = \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)。$$

当应变大于确定的阈值即 $\varepsilon_e > \varepsilon_t$ 时岩体进入损伤阶段。损伤阈值对应于应力峰值处的损伤, 通过试验数据加速蠕变阶段曲线确定, 定义此阶段开始时间应变为阈值应变。

3.3 剪切蠕变损伤本构模型的建立

本文以西原模型为基础, 考虑软弱夹层内含水率随时间变化导致的黏性损伤劣化效应 D_t , 以及非线性的加速蠕变阶段引起的能量损伤 E_t ^[19], 综合以上因素有弹性元件、黏性元件、黏塑性元件, 提出一个新的黏弹性剪切蠕变本构模型, 如图 10。

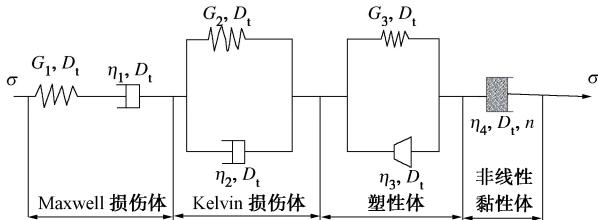


图 10 黏弹性剪切蠕变本构模型关系图

Fig. 10 Constitutive model for viscoelastic-plastic shear creep

(1) 当 $\sigma < \sigma_s$, 此时蠕变参数损伤只考虑时间效应引起的损伤劣化效应 D_t , 其蠕变本构方程表达为

$$\varepsilon = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{G_2}{\eta_2} t \right) \right] + \eta_3(1-D_t) \frac{\varepsilon_4'}{nt^{n-1}} \quad (7)$$

式中: σ_s 为屈服应力; ε_4' 为非线性黏性体应变的一阶导数; n 为流变指数; ε 为应变; ε^* 为加速蠕变的初始值。

(2) 当 $\sigma \geq \sigma_s$, $\varepsilon < \varepsilon^*$ 时, 考虑岩体弹性和蠕变参数的损伤劣化效应 D_t , 此时蠕变损伤本构方程为

$$\varepsilon = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{G_2}{\eta_2} t \right) \right] + \frac{\tau}{\eta_3} t \quad (8)$$

(3) 当 $\sigma \geq \sigma_s$, $\varepsilon \geq \varepsilon^*$ 时, 考虑岩体弹性和材料参数以及蠕变参数以及加速蠕变变化引起的损伤劣化效应 D_t , 此时蠕变损伤本构模型为

$$\varepsilon = \frac{\tau}{G_1(1-D_t)} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{G_2}{\eta_2} t \right) \right] + \frac{\tau}{\eta_3} t + \eta_3(1-D_t) \frac{\varepsilon_4'}{nt^{n-1}} \quad (9)$$

综合以上本构方程可描述含软弱夹层岩质边坡在降雨后一段时间岩体内软弱夹层随时间的材料损伤劣化效应和加速蠕变变化的损伤劣化效应。所建立本构方程可以反映岩体力学参数损伤的瞬时、衰减及稳态蠕变阶段, 还可以反映高剪应力下的加速蠕变状态。

3.4 长期强度预测

岩石的蠕变破坏通常有两个拐点表征岩石状态的变化, 第一个拐点为衰减蠕变阶段进入稳态蠕变阶段, 第二个拐点是稳态蠕变阶段进入到加速蠕变阶段^[20]。因此, 可通过确定两个拐点时间并反映到同一个应力-应变关系图中, 中间水平阶段反映岩土体长期强度。长期强度荷载下岩土时效损伤和材料损伤下, 满足以下关系:

$$D_c = D_\infty + D_E \quad (10)$$

将式(3)和式(5)代入式(10)可得岩体损伤 $E_v = \frac{1}{3m} \left(\left(\frac{2\alpha + \sqrt{6}}{\sqrt{6} - \alpha} - 1 \right) + \frac{6\sqrt{R(d)\chi}}{\sqrt{6} - \alpha} \right) - \alpha d \sqrt{\frac{R(d)}{\chi}}$ (11)

式中: $\chi = \frac{\mu_m}{\eta_2} + \frac{\alpha^2 k_m}{2\eta_1}$, $R(d) = D_c \frac{2\xi}{1 + \xi^2}$, $\xi = D/D_c$ 对损伤变量 d 进行求导以及边界条件式(6)可得长期强度 Q_∞ 的表达式

$$Q_\infty = \frac{2\alpha + \sqrt{6}}{\sqrt{6} - \alpha} Q_3 + \frac{6\sqrt{R(D_\infty)\chi}}{\sqrt{6} - \alpha} \quad (12)$$

对应时刻瞬时损伤 $D_\infty = \xi D_c$ 。

4 边坡相似模拟验证

分析发现含软弱夹层隐伏式岩质边坡在破坏前夕有明显的预兆, 可通过加速蠕变来反映。在前期试验基础上取饱和含水率下岩层倾角水平状态进行实际工程边坡相似模拟验证, 根据相似性原理确定相似比为 20:1 开展试验。

4.1 模型搭建

结合广西巴马-凭祥公路某段边坡滑移情况进行隐伏式软弱夹层相似模拟验证, 边坡搭建如图 11。本次试验根据相似理论及室内试件试验确定软弱夹层采用重晶石粉: 石英砂: 高强石膏: 甘油: 水=2.6: 5.7: 0.3: 0.1: 1.3 调制而成。硬质岩层采用重晶石粉、石英砂、水泥、高强石膏、甘油、水按配比制备。边坡两侧采用实验室长 3 m 宽 10 cm 槽钢逐级固定支撑, 待每层夯实之后再加下一级。为防止软弱夹层向其他硬质岩层渗水造成试验效果不明显, 采取 15 cm × 30 cm 塑料薄膜充当防水层。为模拟雨水在软弱夹层渗流并加快渗流速率采用自吸水棉线进行引导, 每

层两根共4根棉线, 共计10 m。沿软弱夹层方向每层软弱夹层均匀布置土压力采集点, 反映含水率对软弱夹层的压力影响。为防止雨水下渗过程中向硬岩渗水, 采用自吸水棉线穿过塑料软管直至两层软弱夹层, 共计软管5 m。

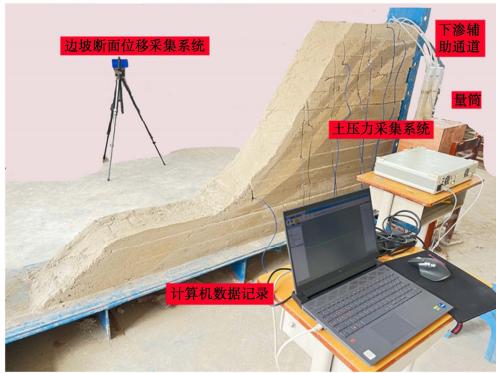


图 11 隐伏非贯通含软弱夹层岩质边坡模拟

Fig. 11 Simulation of concealed non-penetrated rock slope with weak interlayer

计算相似比例确定实际边坡经转换后得边坡底部最长270 cm, 边坡高130 cm, 边坡顶部长85 cm, 边坡台阶长60 cm, 边坡面为60°坡面。其中软弱夹层1长67 cm, 软弱夹层2长118 cm, 夹层角度和实际边坡取值相同均取46°, 软弱夹层隐伏于边坡表面内部。边坡堆砌完成后拆除单面模板各关键组成如图12。

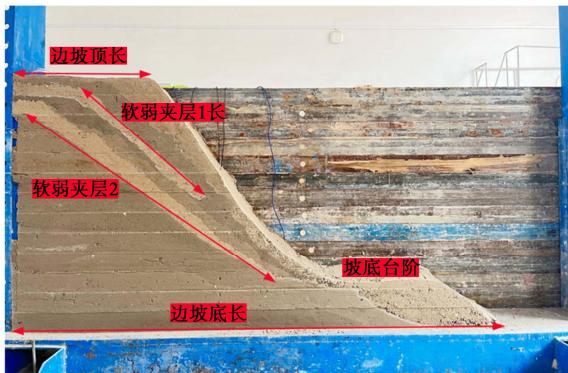


图 12 边坡主要组成示意图

Fig. 12 Main compositions of slope

4.2 滑移情况分析

在经过12 h的持续渗水试验, 在注水速率20 mL/min下边坡内软弱夹层达到饱和状态, 如图13。

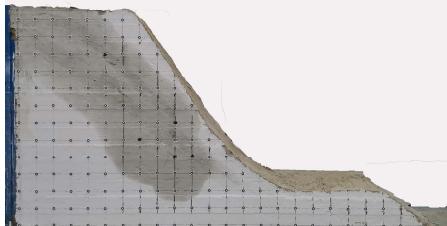


图 13 两层软弱夹层均注水饱和

Fig. 13 Water saturations in two weak interlayers

在12.5 h边坡发生滑移破坏, 如图14, 15, 此时边坡在后缘渗水情况下从边坡顶部开始滑移, 且边坡断面上部首先开始出现剪断裂纹, 上层软弱夹层首先向下滑移, 下层软弱夹层随之产生裂纹但是并没有完全滑移。这是由于软弱夹层随着含水率的增加, 软弱夹层内部力学性能降低、强度丧失, 失去对边坡的整体承载力导致逐步滑坡, 软弱夹层2由于软弱夹层1的下滑导致其上部荷载降低从而重新达到稳定状态, 下部分裂隙是由于软弱夹层1下滑力带动产生。结合以上试验现象验证了剪切蠕变试验的合理性。

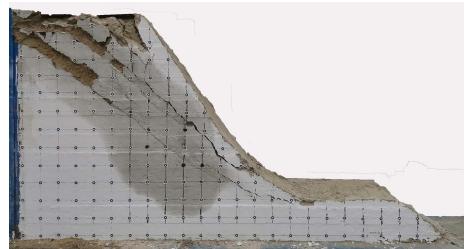


图 14 边坡开始滑移

Fig. 14 Initial slip of slope

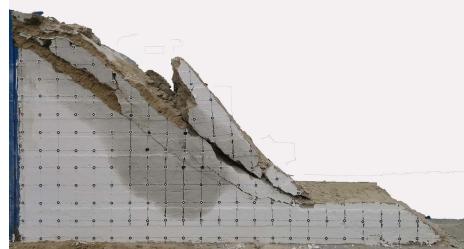


图 15 边坡完全滑移

Fig. 15 Complete slip of slope

从图16, 17可知, 在向软弱夹层注水的过程中, 随着软弱夹层含水率依次升高, 各测点剪切位移也随之增加, 达到饱和后剪切位移趋于稳定增长, 在后期滑坡产生时测点位移快速增加, 与剪切蠕变试验加速蠕变阶段相对应, 整体表现出各测点均有初始衰减蠕变、稳态蠕变和最后滑移前加速蠕变, 其中加速蠕变阶段初始边坡坡角出现剪出口之后边坡断面裂纹进一步扩展直至整体滑移。

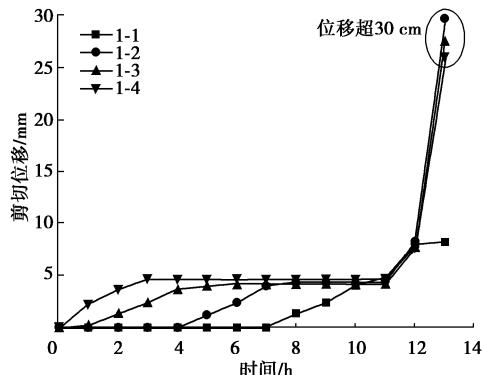


图 16 软弱夹层 1 测点位移情况

Fig. 16 Displacements of measuring points in weak interlayer No. 1

表 2 含软弱夹层岩体蠕变损伤模型参数

Table 2 Creep damage model parameters of rock mass with weak interlayer

剪应力/ MPa	$G_1/$ (MPa · mm ⁻¹)	$G_2/$ (MPa · mm ⁻¹)	$G_3/$ (MPa · mm ⁻¹)	$\eta_1/$ (MPa · h · mm ⁻¹)	$\eta_2/$ (MPa · h · mm ⁻¹)	$\eta_3/$ (MPa · h · mm ⁻¹)	n	D_t	R^2
2.3	289546.26	7.69	186.96	0.12	6.32	78634.95	0.16	0.06	0.985
2.9	39.86	386.21	12.64	12.36	15.96	3532.64	0.26	0.02	0.968
3.5	16.98	15.69	756.32	53.69	48.61	1597.68	0.39	0.05	0.986
4.1	7.95	795.64	35.91	2.39	189.37	48316.26	1.23	0.26	0.974
4.7	13.69	298.79	141.26	138.41	46.96	225.61	1.28	0.81	0.963

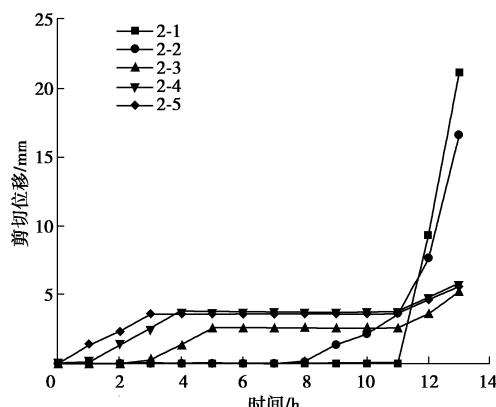


图 17 软弱夹层 2 测点位移情况

Fig. 17 Displacements of measuring points in weak interlayer No. 2

4.3 蠕变损伤模型试验验证

为验证所推导蠕变损伤本构模型的正确合理性, 根据相似模拟试验数据进行拟合分析^[21]。由试验参数可知此时正应力 3.4 MPa, 最大剪应力 5.26 MPa。由图 14, 15 可知含软弱夹层在岩层内部所处位置在 3.4 MPa 正应力下发生剪切蠕变时根据损伤判别公式 $\varepsilon = 5.26 \text{ MPa} \geq \varepsilon^* = 4.7 \text{ MPa}$, 故采用式 (9) 进行拟合运算验证。在试验开始 $t=0$ 时确定初始剪切模量 G_1 , 通过稳态等速蠕变阶段剪切蠕变试验数据代入式 (8) 可求得参数 G_2, η_3 ; 通过衰减蠕变阶段数据代入式 (7) 可确定 η_2 ; 最后通过加速蠕变阶段数据代入式 (9) 以求得 n 。可得到边坡剪切蠕变损伤参数如表 2。

取测点 1-2 分阶段本构拟合, 可得反映蠕变过程的完整曲线及拟合效果曲线图 18。

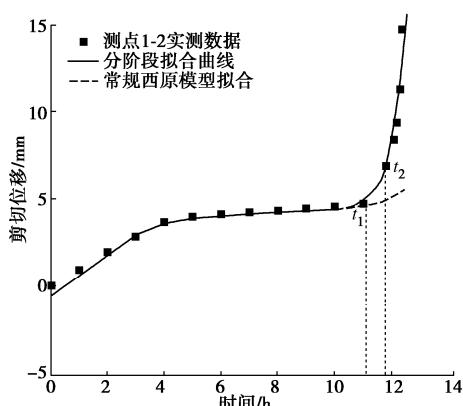


图 18 试验实测值和蠕变损伤模型拟合图

Fig. 18 Fitting diagram of measured values and creep damage model

图 18 中 t_1 时刻蠕变速率骤增即边坡开始滑移, 软弱夹层进入加速蠕变阶段, t_2 时刻剪切位移呈直线增长, 边坡完全失稳滑移。由图 18 可得试验数据和本构模型拟合各个阶段拟合度均大于 0.96, 即该模型可以反映含软弱夹层隐伏式非贯通岩质边坡的剪切蠕变特性, 对衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变阶段解释准确, 具有较高的可信度。

5 结 论

(1) 隐伏式非贯通含软弱夹层岩体在剪切蠕变过程中, 软弱夹层倾角、埋深和岩体稳定性正相关; 夹层含水率和岩体稳定性负相关; 随着软弱夹层所处深度的增加岩体稳定性减小, 但存在一定临界值。

(2) 考虑多参数岩体渐变损伤, 分蠕变阶段建立对应本构模型, 可以较好的反映岩体剪切蠕变过程中瞬时蠕变、衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变阶段。

(3) 通过相似模拟试验揭示隐伏非贯通含软弱夹层岩质边坡的启滑机制, 拟合验证蠕变本构模型的适用性, 对实际边坡滑移起到实际参考效果。

参 考 文 献:

- [1] 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. (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(S2): 112-116. (in Chinese))
- [2] SINGHAL B B S, GUPTA R P. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] 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 Dingping, FENG Xiating, CUI Yujun, 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))
- [4] 孙钧. 岩石流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. (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))
- [5] ZHANG Q Z, SHEN M R, JANG B A, et al. Creep behavior of rocks with rough surfaces[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2016, **28**(9): 1-10.
- [6] 张治亮, 徐卫亚, 王如宾, 等. 含弱面砂岩非线性黏弹塑性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 2634-2639. (ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Rubin, et al. Study of nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of sandstone with weak plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 2634-2639. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 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 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. (in Chinese))
- [9] 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 Xingzhou, LI Jianlin, CHAI Junrui, et al. Shear creep characteristics and constitutive model for interlayer shear belt of high abutment slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1675-1682. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 王建明, 崔新男, 陈忠辉, 等. 露天矿含后缘裂隙岩质边坡岩体卸荷断裂机理与稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 345-353. (WANG Jianming, CUI Xinnan, CHEN Zhonghui, et al. Mechanism and stability of unloading fracture in rock slopes containing trailing edge cracks in open pit mines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 345-353. (in Chinese))
- [13] 王中强, 余志武. 基于能量损失的混凝土损伤模型[J]. 建筑材料学报, 2004, **7**(4): 365-369. (WANG Zhongqiang, YU Zhiwu. Concrete damage model based on energy loss[J]. Journal of Building Materials, 2004, **7**(4): 365-369. (in Chinese))
- [14] 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 Qiangyong, YANG Wendong, ZHANG Jianguo, 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))
- [15] 杨圣奇, 徐 鹏. 一种新的岩石非线性流变损伤模型研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1846-1854. (YANG Shengqi, XU Peng. A new nonlinear rheological damage model for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1846-1854. (in Chinese))
- [16] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 433-447. (XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 433-447. (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 Heping, JU Yang, LI Liyun. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1729-1740. (in Chinese))
- [18] 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. Rheology of Geotechnical Materials and Its Engineering Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [19] 薛永涛. 参数非定常的软岩非线性黏弹塑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))
- [20] ZHU Q Z. Strength prediction of dry and saturated brittle rocks by unilateral damage-friction coupling analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2016, **73**(3): 16-23.
- [21] 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): 16-21. (LÜ Aizhong, DING Zhikun, JIAO Chunmao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 16-21. (in Chinese))