

川西康定—新都桥段菠茨沟组板岩蠕变特性及损伤模型

何 箫, 侯圣山, 孟宪森, 陈 亮, 刘明学, 冯 振, 李 昂, 吉 锋, 郭长宝

Creep characteristics and nonlinear creep damage model of Bocigou formation slate in Kangding-Xinduqiao section of West Sichuan

HE Xiao, HOU Shengshan, MENG Xiansen, CHEN Liang, LIU Mingxue, FENG Zhen, LI Ang, JI Feng, and GUO Changbao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137-143

黄土三趾马红土滑坡滑带土的长期强度影响因素研究

Experimental investigation of influencing factors on the long-term strength of sliding zones of the Loess-Hipparion laterite landslide

祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 苗帅升, 李红飞, 兰恒星 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 148-156

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209041

何箫, 侯圣山, 孟宪森, 等. 川西康定—新都桥段菠茨沟组板岩蠕变特性及损伤模型 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 107-116.

HE Xiao, HOU Shengshan, MENG Xiansen, *et al.* Creep characteristics and nonlinear creep damage model of Bocigou formation slate in Kangding-Xinduqiao section of West Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 107-116.

川西康定—新都桥段菠茨沟组板岩蠕变特性及损伤模型

何箫^{1,2}, 侯圣山^{2,3,4}, 孟宪森^{1,2}, 陈亮^{2,3,4}, 刘明学^{2,3,4}, 冯振^{2,3,4}, 李昂^{2,3,4}, 吉锋¹, 郭长宝⁵

(1. 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;
2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081; 3. 自然资源部四川雅安地质灾害野外科学观测研究站, 四川雅安 625099; 4. 自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心, 北京 100081; 5. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 岩石的蠕变特性与岩体的长期稳定性有着密切联系。随着我国西部地区各深埋隧道的开挖, 为保证工程安全性及地下建筑的长期稳定, 迫切需要开展复杂应力状态下岩石蠕变特性的研究。传统的蠕变本构模型难以对岩石加速蠕变阶段进行准确的描述, 且现有蠕变模型难以对菠茨沟组板岩的蠕变特性进行有针对性的拟合。因此, 选取川西康定—新都桥段菠茨沟组板岩为研究对象, 在查明地质环境背景和岩石矿物成分基础上开展了卸荷蠕变试验, 分析了菠茨沟组板岩在卸荷条件下的变形特征, 揭示了板岩蠕变特性及卸荷过程中的损伤演化规律; 考虑卸荷蠕变过程中的损伤累积效应, 引入损伤变量, 对传统西原模型中牛顿体元件进行改进, 建立能描述加速蠕变阶段的蠕变损伤模型。研究表明: 卸荷条件下, 板岩变形以瞬时弹性应变为主, 随偏应力水平增加蠕变现象显著增强; 板岩的长期强度有 20.2%~27.1% 折减; 采用 1-stOpt 对非线性蠕变损伤模型进行参数辨识, 拟合理论曲线与试验值吻合度较高, 相关系数达到 0.945; 损伤变量引入后, 改进的非线性蠕变损伤模型可以较合理地描述研究区板岩卸荷蠕变特性。该研究可为相关工况下围岩稳定性分析提供理论依据。

关键词: 板岩; 三轴卸荷蠕变试验; 长期强度; 卸荷蠕变损伤模型; 参数辨识

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0107-10

Creep characteristics and nonlinear creep damage model of Bocigou formation slate in Kangding-Xinduqiao section of West Sichuan

HE Xiao^{1,2}, HOU Shengshan^{2,3,4}, MENG Xiansen^{1,2}, CHEN Liang^{2,3,4}, LIU Mingxue^{2,3,4}, FENG Zhen^{2,3,4},
LI Ang^{2,3,4}, JI Feng¹, GUO Changbao⁵

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR), Beijing 100081, China;
3. Observation and Research Station of Geological Hazard in Sichuan Ya'an, Ministry of Natural Resources, Ya'

收稿日期: 2022-09-19; 修订日期: 2022-12-01

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000505); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221748)

第一作者: 何箫(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事卸荷条件下岩石蠕变劣化特性的研究工作。E-mail: 810540839@qq.com

通讯作者: 侯圣山(1977-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测相关研究。E-mail: houshengshan@mail.cgs.gov.cn

an, Sichuan 625099, China; 4. Technology Innovation Center for Geohazard Monitoring and Risk Early Warning, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The creep characteristics of rock are closely related to the long-term stability of rock mass. With the excavation of deep buried tunnels in west China, in order to ensure the safety of engineering and the long-term stability of underground buildings, it is particularly important to study the creep characteristics of rock under complex stress conditions. The traditional creep constitutive model is difficult to accurately describe the accelerated creep stage of rock, and the existing creep model is difficult to fit the creep characteristics of the Pocigou Formation slate. This study takes the Bocigou Formation slate in the Kangding-Xinduqiao section of west Sichuan as the research object. Based on the identification of geological environment background and rock mineral composition, the unloading creep test is carried out. The deformation characteristics of the Bocigou Formation slate under unloading conditions are analyzed, and the creep characteristics of the slate and the damage evolution law during unloading are revealed. Considering the cumulative damage effect in the unloading creep process, the damage variable is introduced to improve the Newtonian element in the traditional Nishihara model, and a creep damage model which can describe the accelerated creep stage is established. The results show that under unloading conditions, the deformation of slate is dominated by instantaneous elastic strain, and the creep phenomenon is significantly enhanced with the increasing deviatoric stress level. The long-term strength of slate is reduced by 20.2%–27.1%. The 1-stOpt is used to identify the parameters of the nonlinear creep damage model. The fitting theoretical curve is in good agreement with the experimental value, and the correlation coefficient reaches 0.945. The improved nonlinear creep damage model after the introduction of damage variable is more reasonable for description of the unloading creep characteristics of slate in the study area, which provides a theoretical basis for the stability analysis of surrounding rock under relevant working conditions.

Keywords: slate; triaxial unloading creep test; long-term strength; unloading creep damage model; parameter identification

随着国家“一带一路”和西部大开发战略实施,西部地区开建大量深埋长大隧道,开挖过程使得岩体原有应力平衡遭到破坏。研究表明,在卸荷条件下,隧洞围岩蠕变现象十分的明显,如不加以适当的处理,可能会造成围岩塌方、大变形等严重后果^[1-3]。因此,对围岩在卸荷条件下的蠕变特性进行系统研究,对保障施工的顺利进行有着重大的意义。

近些年,国内外学者对于围岩的蠕变现象已经做了较多的研究,对于蠕变本构模型的建立已经有了比较完善的体系。目前,建立本构模型主要是基于蠕变试验数据,将蠕变曲线所体现出的岩石力学特性对应的各基本元件进行串并联组合,以拟合预测不同地应力条件下围岩变形与时间的关系。而相比传统的三轴蠕变试验,卸荷蠕变试验存在试验过程中各级围压下偏应力水平相对较低、每级偏应力水平下总变形量较小、进入加速蠕变阶段时间相对较短等特点。这对所建立本构模型的精度以及合理性都有较高的要求,传统蠕变本构模型如西原模型等往往不能较好地拟

合。针对此问题,国内外学者对卸荷蠕变非线性蠕变本构模型的建立进行了大量研究。周瑞鹤等^[4]基于分数阶导数引入了黏塑性蠕变启动元件,构建了一套参数相对较少,更易于结合数值分析软件的粉砂岩蠕变特性及蠕变模型。谢林杰^[5]将 Kelvin 体串联到了线性黏弹性模型中,再与塑性体并联,得到了一个能够反映岩石非线性蠕变特征的四元件黏塑性模型。李任杰^[6]通过分析蠕变试验数据,利用分数阶微积分软件元件替换 Kelvin 模型中整数阶黏壶元件,建立了非贯通硬性结构面本构模型。康永刚等^[7]使用非定常、非牛顿黏壶和塑性体并联的黏塑性体,给出了一种改进的岩石蠕变本构关系。崔阿能等^[8]建立了 2 种黏性系数随应力水平和时间变化的黏性元件,得到了一种新的岩石非线性黏弹塑性五元件蠕变模型。张子洋等^[9]引入了一个与时间应力水平相关的非线性黏塑性元件,将它与广义 Kelvin 体和带开关的黏性体串联,得到了改进的非线性黏弹塑性蠕变模型。马民杰^[10]用损伤理论反映岩石性质软化,构建出了可反映岩石非

线性蠕变全过程的弹塑性蠕变模型。张志强等^[11]引入蠕变启动阈值,建立了橄榄岩粘弹塑性蠕变本构模型。刘振等^[12]通过引入分数阶 Abel 黏壶与 Kelvin 模型串联形成新型黏弹性模型,得到了一个新的岩石蠕变损伤模型。李安润等^[13]提出基于经典 Burgers 模型并具有水-岩作用劣化特征的含水损伤蠕变本构模型。

综上所述,国内外学者对于蠕变本构模型的建立方法以及不同地质情况下的岩石蠕变本构模型进行了大量研究,提出了诸多理论。在川西地区中,高边坡和深埋隧洞多为卸荷工况,对比传统三轴蠕变,卸荷蠕变更契合研究区实际工程中的开挖卸荷工况,然而,对于应用于康定地区菠茨沟组板岩卸荷蠕变本构模型的探索还相对薄弱,试验结果表明该地区板岩相比常见板岩类型存在着硬度更大、层厚度更大、均一性更好、进入加速蠕变更快等特点,现有的卸荷蠕变本构模型难以直接加以运用,因此,随着青藏高原

及周边地区工程建设的大力推进,十分有必要对该地区板岩在卸荷条件下的损伤特性进行研究。

以川西某隧道菠茨沟组板岩为研究对象,在查明地质环境背景和岩石矿物成分基础上,进行固定轴压卸载围压的卸荷蠕变试验,对板岩在卸荷蠕变过程中的应变特性、蠕变速率和长期强度等进行分析;并基于此构建卸荷蠕变非线性蠕变损伤模型,进行参数辨识及拟合。

1 地质背景及岩石蠕变试验

1.1 地质环境背景

研究区位于青藏高原东南缘的川滇菱形块体西北边界。研究区内分布多条 NE 向、NW 向和近 NS 向断裂,主要断裂带有玉龙希和鲜水河断裂,广泛分布三叠系菠茨沟组岩层。研究区区域地质及地质构造如图 1 所示。

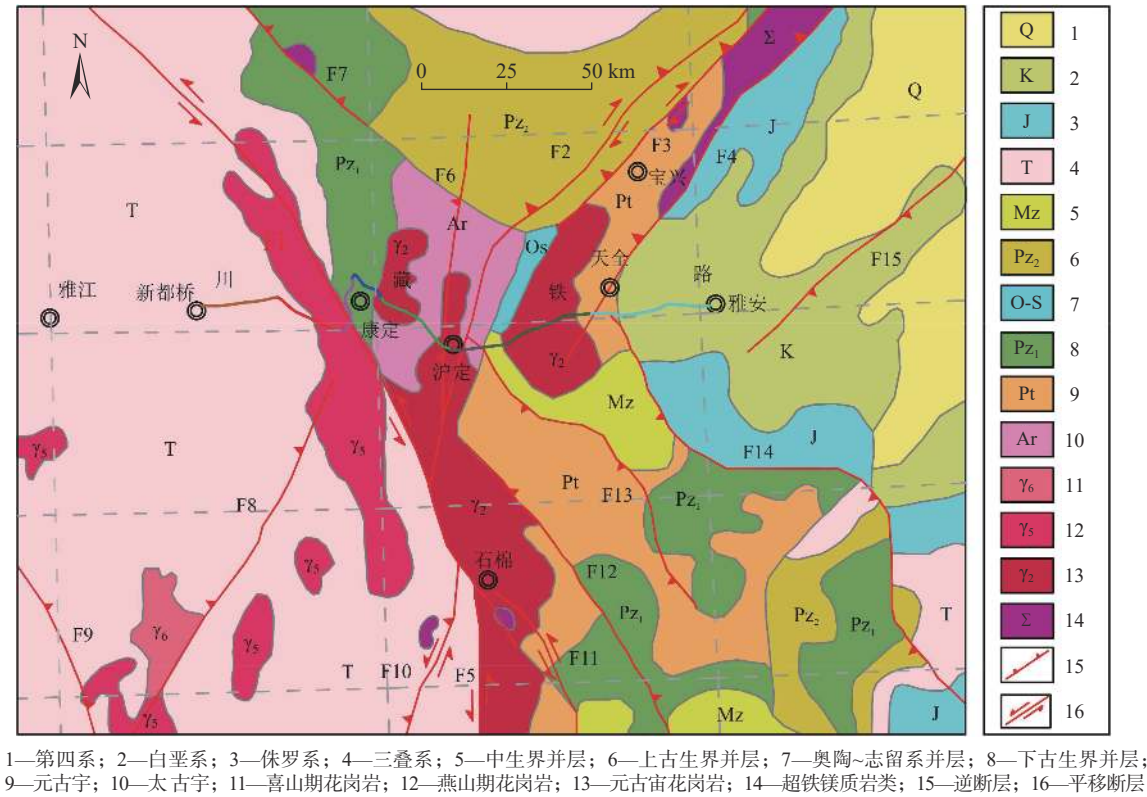


图 1 雅安至新都桥区域地质及构造简图 (据文献 [14] 修改)

Fig. 1 Regional geology and tectonic map in the Ya'an-Xinduqiao area (modified from Ref. [14])

注: F1—鲜水河断裂带; F2—龙 门山断前山裂带; F3—龙门山中央断裂; F4—龙门山后山断裂; F5—安宁河断裂; F6—大渡河断裂; F7—玉科断裂; F8—玉龙希断裂; F9—理塘—德巫断裂; F10—小金河断裂; F11—石棉断裂; F12—汉源—甘洛断裂; F13—保新厂—凤仪断裂; F14—荣经—马边—盐津断裂; F15—蒲江—新津断裂; F16—龙泉山断裂

1.2 矿物成分

本次试验的岩石样品取自川西某工程隧道内, 岩

性为板岩, 整体呈灰黑色, 块状构造, 具有变余粉砂状泥质结构, 节理发育较少, 风化程度较低。

岩石样品偏光显微镜下显微鳞片变晶结构(图 2), 变余微水平层理构造, 层理延伸平直。其中粉砂级碎屑体积分数约为 20%, 成分为粗粉砂的石英、长石、白云母及绿泥石化黑云母; 黏土矿物体积分数约为 30%, 主要分布于粉砂颗粒相对较少的纹层内; 碳-铁质体积分数约为 8%~10%; 方解石体积分数约为 3%; 重矿物体积分数约为 1%, 主要为赤铁矿等, 呈板片状; 绢云母体积分数约为 18%, 呈微小的鳞片状, 总体长轴沿层理方向定向; 长英质体积分数约为 12%; 黑云母体积分数约为 4%, 微小片状, 无定向; 石墨体积分数约为 1%, 呈板状, 无定向, 透射光下黑色不透明, 形成相对较晚。岩石经历较弱的区域热动力变质作用, 但变形较弱, 后期表现为热变质为主。

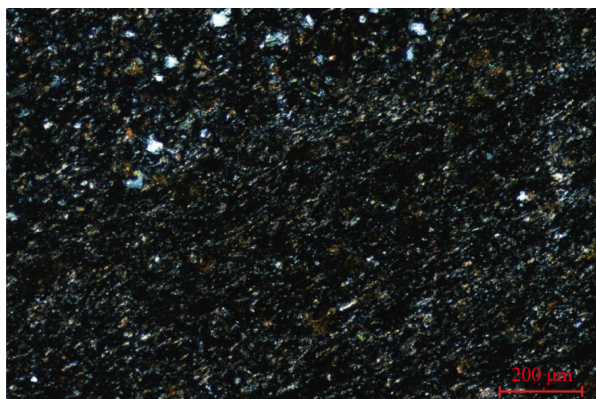


图 2 偏光显微镜下薄片图像

Fig. 2 Slice image under polarizing microscope

1.3 蠕变试验仪器

本次试验采用的试验设备是由成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点试验室自主研发的 YSJ-01-00 型岩石三轴蠕变试验机(图 3)。该试验机的围压范围为 0~30 MPa, 轴向荷载范围为 0~600 kN, 轴向荷载和围压的测试精度均为 0.5% FS, 轴向荷载和围压恒定时间可以保持 6 个月以上, 满足本次力学试验的要求。

1.4 试样制备

参照《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)^[15] 的试件加工精度要求, 将岩石切割成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱样, 试样的高度、直径允许误差为 $\pm 0.3 \text{ mm}$; 试件两端面的不平行度允许偏差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 端面应垂直于试件轴线, 允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

1.5 卸荷蠕变试验方案

基于岩石常规三轴试验以及单轴抗压试验, 参考现有研究成果^[4, 16-17], 制定以下试验方案。设定围压 σ_3 为 5.0, 7.5 MPa 2 个试验组。为了保证试样在 3 级荷载



图 3 YSJ-01-00 型岩石三轴蠕变试验机

Fig. 3 YSJ-01-00 rock triaxial creep testing machine

之后发生破坏, 轴向荷载取值为常规三轴试验下试样峰值强度的 75%, 在围压为 7.5 MPa 和 5.0 MPa 条件下, 板岩试样的峰值强度分别为 168.5 MPa 和 153.0 MPa。围压采用逐级卸荷的方式, 卸荷路径如图 4 所示。考虑到卸荷蠕变试验周期较长, 每级围压保持 24 h, 然后重复卸围压操作直至试样破坏, 整个试验过程中保持轴向荷载恒定。

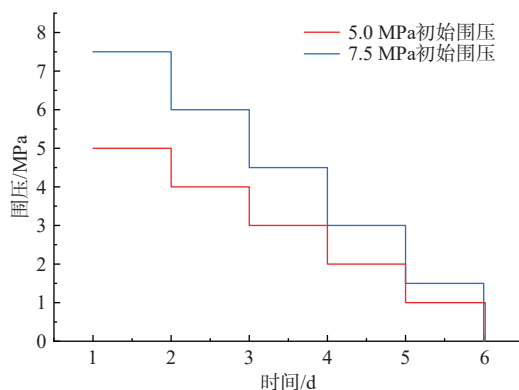


图 4 不同初始围压下卸荷蠕变试验围压卸荷路径

Fig. 4 Unloading path of unloading creep test under different initial confining pressures

2 试验结果与分析

2.1 板岩蠕变特性

根据岩石三轴卸荷蠕变力学试验曲线, 可分析在不同应力水平下板岩的蠕变变形随时间变化的规律。参考已有成果^[18-20], 采用玻尔兹曼线性叠加的方式, 绘制板岩在围压 $\sigma_3=7.5 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3=5.0 \text{ MPa}$ 下的三轴卸荷蠕变轴向应变-时间曲线(图 5)。图 6 为板岩在围压 $\sigma_3=7.5 \text{ MPa}$ 时的最后一组轴向应变及蠕变速率曲线。表 1 为不同围压下板岩试样三轴卸荷蠕变试验数据。

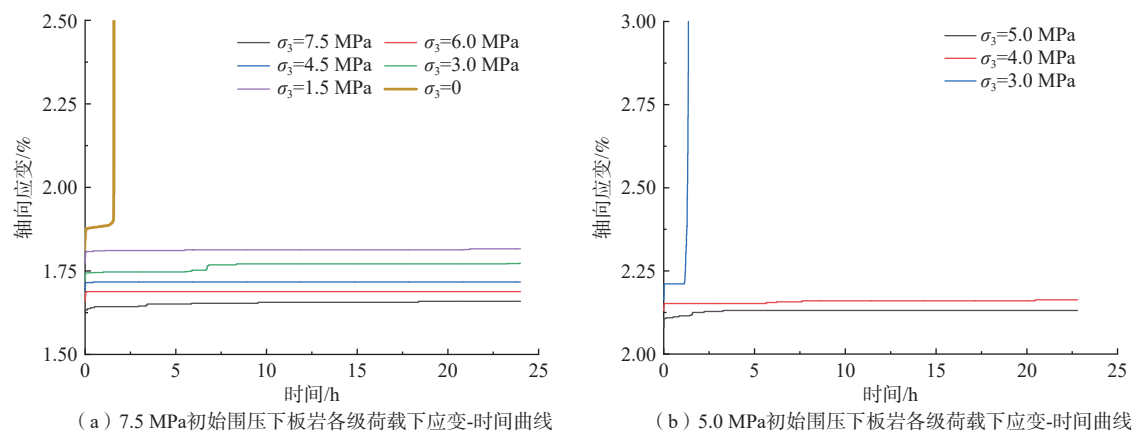


图 5 板岩卸荷蠕变应变-时间曲线
Fig. 5 Slate unloading creep strain-time curve

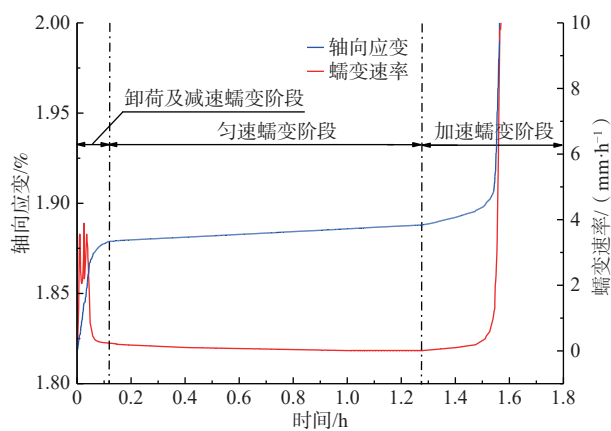


图 6 初始围压 7.5 MPa 下最后一级卸荷蠕变应变-时间曲线
Fig. 6 Strain-time curve of the last unloading creep under the initial confining pressure of 7.5 MPa

表 1 各级围压作用下板岩三轴压缩卸荷蠕变试验结果
Table 1 Results of the triaxial compression unloading creep test of slate under different confining pressures

轴向荷载/kN	围压/MPa	瞬时弹性应变	轴向蠕变总量	比值/%
252.76	7.5	1.629	0.030	1.84
	6.0	0.026	0.006	23.10
	4.5	0.022	0.005	22.70
	3.0	0.021	0.029	138.00
	1.5	0.027	0.008	29.60
	0	0.064	0.019	29.70
229.50	5.0	2.080	0.051	2.45
	4.0	0.028	0.011	39.30
	3.0	0.021	0.080	38.10

分析图 5 和表 1, 在 7.5 MPa 初始围压下, 试样在第 6 级围压作用下发生破坏, 并在最后一级进入加速蠕变阶段, 第 1 级围压作用下, 试样的瞬时弹性应变远大于第 2~6 级围压, 且随着偏应力的增加, 瞬时轴向应变增量逐渐减小, 表明试样的弹性模量逐渐增大, 试样表现出硬化性质。在第 4 级围压作用下, 试样轴

向蠕变总量与瞬时应变增量比值达到 138%, 表明板岩试样在第 4 级围压作用期间可能存在较大规模的结构面局部贯通现象, 但还未形成贯通试样的宏观破坏结构面; 其余级别的围压作用下, 试样轴向蠕变总量与瞬时应变增量比值均不超过 30%, 验证了硬质岩在蠕变全过程中仍以瞬时弹性应变为主的观点^[21]; 在 5.0 MPa 初始围压下, 试样在第 3 级围压进入加速蠕变阶段, 每级卸荷时瞬时应变增量有所降低, 试样轴向蠕变总量与瞬时应变增量比值均不超过 40%, 但仍以瞬时弹性应变为主, 表现出的破坏特性与 7.5 MPa 初始围压下基本保持一致。

由图 6 可以看出, 岩石初始蠕变速率值为 3.80 mm/h, 该速率值在 0.1 h 内迅速减小, 在稳定蠕变阶段, 蠕变速率保持在 0.1 mm/h 附近, 最后在极短时间内剧增。分析认为, 造成岩石蠕变速率和蠕变应变剧增的原因是岩石蠕变过程中内部微缺陷不断发育, 当超过某一临界条件后, 微缺陷加速拓展、贯通, 由此造成宏观变形破坏。菠茨沟组板岩相较于常见的板岩, 在减速蠕变及加速蠕变阶段, 蠕变速率处于更高水平; 而在稳态蠕变阶段, 蠕变速率又处于更低水平。说明在稳态蠕变阶段, 菠茨沟组板岩内部裂隙萌生或者扩展更慢, 进入加速蠕变阶段阈值更高, 在加速蠕变阶段后, 裂隙贯通得更快。

2.2 长期强度分析

岩石的长期强度是指岩石在长期荷载作用下抵御破坏的强度值, 这一指标对评价工程的长期稳定性有着重要意义。一般来说, 常用的岩石蠕变长期强度的确定方法有 3 种: 过渡蠕变法、稳态蠕变速率交点法和等时曲线法^[18, 22]。本文采用的岩石蠕变长期强度的确定方法为等时曲线法, 通过 Boltzmann 原理进

行叠加得到不同应力水平下相同时间所对应的应力与应变的关系曲线, 择取不同偏应力水平下, 0, 6, 12, 18, 24 h 时刻的偏应力-应变数据, 得到板岩试样在 7.5, 5.0 MPa 初始围压下的偏应力-应变曲线, 如图 7 所示。

观察分析图 7 的等时偏应力-应变曲线, 发现随着

时间的推移, 曲线呈现出逐渐远离偏应力轴的趋势, 且在前 6 h, 曲线偏移量明显较大。另外, 曲线斜率呈现出 2 种趋势, 一是由左侧斜率较大的线段组成, 二是右侧斜率较小的线段组成。在二者之间的转折点处, 轴向应变突然加大, 故认为该点所对应的轴向应力即为目标长期强度。

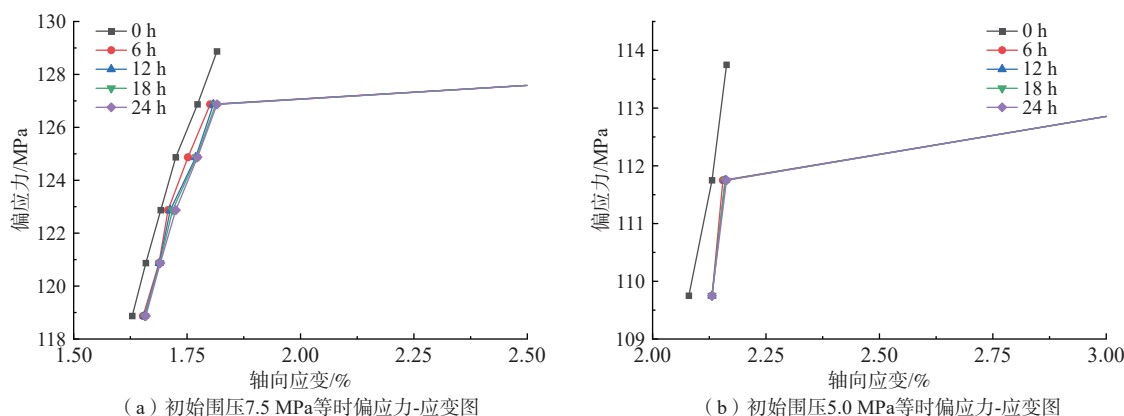


图 7 不同初始围压下等时偏应力-应变图

Fig. 7 Isochronous deviatoric stress-strain diagram under different initial confining pressures

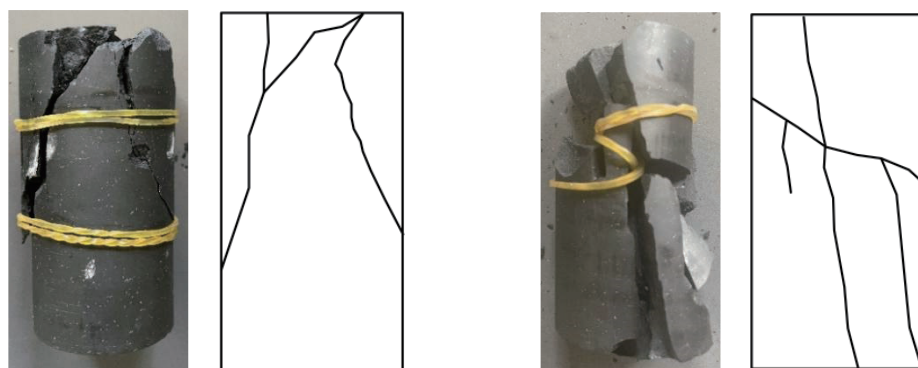
在初始围压为 7.5 MPa 的条件下, 板岩长期强度为 127.43 MPa, 三轴抗压强度为 168.50 MPa, 前者为后者的 79.8%; 在初始围压为 5.0 MPa 的条件下, 板岩长期强度为 111.63 MPa, 三轴抗压强度为 153.00 MPa, 前者为后者的 72.9%。说明菠茨沟组板岩在卸荷条件下, 长期强度会有较大幅度的折减。

2.3 破坏特征分析

图 8 为板岩在 7.5, 5.0 MPa 初始围压条件下卸荷蠕变试验的破坏形态, 从图中可以看出, 在 2 种不同的围压条件下, 板岩破坏均为剪切破坏, 结合板岩最后一级轴向应变-时间曲线可知, 在 7.5 MPa 初始围压

条件下, 板岩最后一级围压蠕变总时长 1.53 h, 从加速蠕变直至试样破坏共经历 0.22 h, 仅占总蠕变时长的 14.4%, 因此将板岩破坏定性为脆性剪切破坏。

从破坏特征上看, 在初始围压为 5.0 MPa 时, 板岩破坏后的整体性相较于 7.5 MPa 更好。在 5.0 MPa 初始围压下, 板岩发育 2 条主裂缝及少许次裂缝, 2 条主裂缝于试样顶部交叉, 呈现“V”型剪切面贯穿整个试样, 剪切面颗粒物较少。初始围压为 7.5 MPa 情况下, 板岩破坏后较破碎, 发育 2 条主裂缝以及多条次裂缝, 2 条主裂缝于试样中部交叉, 呈 X 型剪切面贯穿整个试样。剪切面可见较多颗粒物。



(a) 初始围压 5.0 MPa 下试样卸荷蠕变破坏形态及素描图 (b) 初始围压 7.5 MPa 下试样卸荷蠕变破坏形态及素描图

图 8 不同初始围压下板岩试样卸荷蠕变破坏形态及素描图

Fig. 8 Unloading creep failure pattern and sketch of slate specimen under different initial confining pressures

进一步分析以上现象,发现在 7.5 MPa 初始围压条件下,板岩试样经历 5 次卸荷后发生破坏,蠕变总时长达 121.6 h;在 5.0 MPa 初始围压下,板岩试样经历 2 次卸荷即发生破坏,蠕变总时长 49.4 h。结合试样的破坏特征,可见初始围压水平控制卸荷蠕变时长,进而影响板岩内部的裂隙演化水平。整体围压水平的升高会使试样内部裂隙有更充分的扩展时间,剪切面间错动摩擦时间增加,这导致在试样出现宏观破坏时,剪切面上出现较多的碎状颗粒。

3 非线性损伤蠕变模型研究

3.1 基础模型选取

结合图 5、图 6 及表 1 可知,在每一级卸荷的初期阶段,试样会产生瞬时弹性应变,在构建岩石本构模型时应添加弹性体原件,在此阶段,应力与应变之间为线性增长关系。当卸荷阶段结束,附加应力基本恒定,试样进入稳态蠕变阶段。在此阶段,试样蠕变速率会随时间降低,因此,本构模型中应包含牛顿体元件,以描述存在时间效应的稳态蠕变阶段。当蠕变量到达某一定值,试样进入加速蠕变阶段,产生不可恢复的塑性变形并最终形成宏观破坏面,此阶段应用塑性元件加以描述。各元件如图 9 所示。

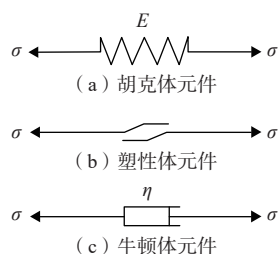


图 9 本构模型原始元件

Fig. 9 Original elements of the constitutive model

注: σ 为应力; E 为弹性模量; η 为黏性系数。

3.2 非线性蠕变本构模型构建

对比分析多个模型特点^[23-25],本文选择西原模型为基础模型,西原模型中包含了胡克体元件、黏弹性体及黏塑性体(牛顿体)能较好地反映岩石的黏弹塑性变形性质,但是,大量研究以及应用表明^[26-28],西原模型对于岩石加速蠕变阶段的描述还不够准确。通过分析西原模型的本构方程,发现西原模型的牛顿体黏性系数为定值,而图 5、图 6 的试验结果表明菠茨沟组板岩存在进入加速蠕变阶段的时间快、加速蠕变阶段相对较短等特点。西原模型无法对加速蠕变阶段

的曲线进行拟合。

因此,考虑到菠茨沟组板岩蠕变过程中的损伤累计,同时为了更好地契合加速蠕变阶段时间短的特点,引入损伤变量(D)对西原模型中的牛顿黏性体加以改进,使其能够反映板岩内部损伤累计导致的黏性系数的动态变化。改进后的黏性体元件如图 10 所示。

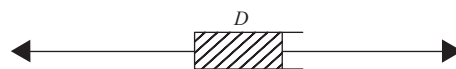


图 10 改进后黏性体元件

Fig. 10 Improved viscous element

传统的牛顿体本构关系为:

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ ——应变率/ $\%$ 。

引入 D 后,得到改进的牛顿体黏性体本构关系为:

$$\sigma = \eta(1 - D)\dot{\varepsilon} \quad (2)$$

结合菠茨沟组板岩蠕变特点及相关研究^[29],采用负指数关系描述板岩蠕变过程中 D 与时间(t)之间的函数关系^[14]:

$$D = 1 - e^{(-\alpha t)} \quad (3)$$

式中: α ——材料系数。

将式(3)代入式(2)得到改进后的动态黏性系数黏壶元件本构关系为:

$$\sigma = \eta e^{(-\alpha t)} \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),并对其积分,得到改进后动态黏性系数黏壶元件的本构方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\alpha \eta} (e^{\alpha t} - 1) \quad (5)$$

用改进后动态黏性系数黏壶元件替换西原模型中的黏壶元件,得到改进后考虑损伤变量的变黏性系数西原模型,如图 11 所示。

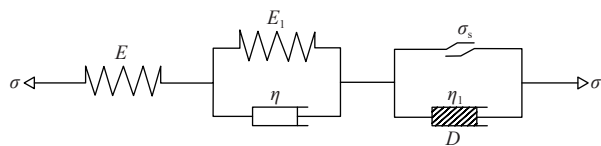


图 11 变黏性系数西原本构模型

Fig. 11 West original constitutive model with variable viscosity coefficient

注: E_1 为 Kelvin 模型弹性模量; η_1 为牛顿体模型黏性系数; σ_s 为屈服强度。

基于原始西元模型推导出适用于菠茨沟组板岩卸荷蠕变类型的动态黏性系数西原本构方程,如式(6)所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_1} \left[1 - e^{\left(-\frac{E_1}{\eta} t \right)} \right] & \sigma < \sigma_s \\ \varepsilon &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_1} \left[1 - e^{\left(-\frac{E_1}{\eta} t \right)} \right] + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_s}{\alpha \eta_1} [e^{\alpha t} - 1] & \sigma > \sigma_s \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: σ_1 ——各级围压对应的轴压/MPa;

σ_3 ——围压/MPa。

4 蠕变损伤模型验证及参数辨识

确定蠕变本构模型后,需根据板岩三轴卸荷蠕变试验结果,对蠕变本构模型进行参数辨识工作,得到相应力学参数,以验证模型的合理性及适用性。本文参数辨识工作借助于软件 1-stOpt,采用 Levenberg-Marquardt 优化算法(即最小二乘算法),通用全局优化算法对模型参数进行逐次线性迭代求解。

卸荷蠕变本构模型中, E 为每一级围压对应的弹性模量,可通过应力-应变关系求解,因此,需对 E_1 、 η 、 η_1 、 α 等 4 个参数进行辨识。本文选取卸荷级数更多,更具代表意义的初始围压 7.5 MPa 下的卸荷蠕变试验数据进行参数辨识,得到各应力水平下的模型参数如表 2。

表 2 初始围压 7.5 MPa 下西原改进模型参数辨识结果

Table 2 Parameter identification results of the Nishihara improved model under the initial confining pressure of 7.5 MPa

参数	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	E_1 /GPa	η /(GPa·h)	η_1 /(GPa·h)	α
结果	126.38	7.5	4.23	12.97		
	126.38	6.0	9.26	0.41		
	126.38	4.5	30.94	8.52		
	126.38	3.0	3.57	28.98		
	126.38	1.5	7.83	2.05		
	126.38	0	10.48	2.04	0.016	1.35×10^8

将各级围压下的模型参数代入改进后的卸荷蠕变本构模型,得到改进后西原模型理论卸荷蠕变曲线,与实际卸荷蠕变曲线进行对照,得到对照图(图 12)。由图 12 可知,改进后的卸荷蠕变西原本构模型能够较为全面地对板岩卸荷蠕变全过程进行描述,并且能够较准确地对卸荷蠕变最后一级围压水平下的 3 个蠕变阶段进行拟合,改进后的西原模型对加速蠕变阶段的拟合效果较好,相关系数达到 0.945。综上,改进后的西原模型能够较好地反映研究区板岩在卸荷条件下的蠕变力学特性,可为研究区在隧洞开挖等卸荷工况下的围岩稳定性分析提供一定的理论指导和试验依据。

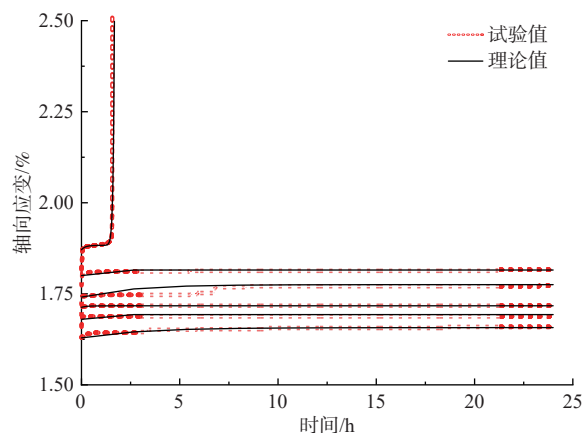


图 12 围压 7.5 MPa 下卸荷蠕变与西原改进模型曲线对比

Fig. 12 Comparison of the unloading creep and the Nishihara improved model curve under the confining pressure of 7.5 MPa

5 结论

(1) 研究区板岩具有变余粉砂状泥质结构,显微鳞片变晶结构,变余微水平层理构造,层理延伸平直。主要由少许的粉砂粒级碎屑、残留的未经明显重结晶的黏土矿物、变质结晶的鳞片状绢云母、细小长英质、微片状黑云母及石墨、重结晶的方解石等组成。

(2) 板岩在蠕变全过程中仍以瞬时弹性应变为主,随着围压的减小,岩石表现出硬化特性。在匀速蠕变过程中,不足以构成宏观结构面单规模相对较大的结构面贯通效应。相比常见板岩,菠茨沟组板岩内部裂隙萌生或者扩展更慢,进入加速蠕变阶段阈值更高,在加速蠕变阶段,裂隙贯通得更快。

(3) 菠茨沟组板岩在卸荷蠕变试验中的破坏类型为脆性剪切破坏,初始围压水平影响板岩内部的裂隙演化水平,对卸荷蠕变时长有较为明显的抑制效应。对比常规三轴试验得到的抗压强度,在 7.5, 5.0 MPa 围压下,板岩长期强度分别下降了 20.2%、27.1%。

(4) 结合卸荷蠕变试验以及试验过程中的损伤累计效应,对现有西原模型进行了改进并引入损伤变量,得到考虑损伤累计效应的变黏壶系数西原本构模型。根据试验数据对改进后的西原模型进行了参数辨识工作。辨识后的参数得到的试验理论值与实际试验值一致性较好,验证了该非线性卸荷蠕变本构模型的合理性。

参考文献 (References):

- [1] 蒋仕荣,虞子楠. 页岩卸荷蠕变的力学特性及其非线性模型[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(5): 585 -

590. [JIANG Shirong, YU Zinan. Unloading creep mechanical properties and nonlinear model of shale[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(5): 585 – 590. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 许多, 吴世勇, 张茹, 等. 锦屏深部大理岩蠕变特性及分数阶蠕变模型 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1456 – 1464. [XU Duo, WU Shiyong, ZHANG Ru, et al. Creep characteristics and creep model of deep buried marble at Jinping underground laboratory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1456 – 1464. (in Chinese with English abstract)]
- [3] YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, et al. Potential seismic landslide hazard and engineering effect in the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet transportation corridor, China[J]. China Geology, 2023, 6(1): 228 – 240.
- [4] 周瑞鹤, 程桦, 蔡海兵, 等. 三轴压缩分级卸荷条件下粉砂岩蠕变特性及蠕变模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1136 – 1147. [ZHOU Ruihe, CHENG Hua, CAI Haibing, et al. Creep characteristics and creep model of siltstone under triaxial compression and graded unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1136 – 1147. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 谢林杰. 砂岩加载与卸荷蠕变特性及非线性黏弹塑性模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017 [XIE Linjie. Loading and unloading creep properties of sandstone and research on a nonlinear viscoelasto-plastic creep model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李任杰. 非贯通硬性结构面蠕变特性及本构模型研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020 [LI Renjie. Study on creep characteristics and constitutive model of non-persistent rigid structural surface[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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 Yonggang, ZHANG Xiue. An improved constitutive model for rock creep[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1049 – 1055. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 崔阿能, 胡斌, 崔凯, 等. 基于应力-时间双阈值条件的岩石黏弹塑性蠕变模型 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 125 – 132. [CUI Aneng, HU Bin, CUI Kai, et al. A model of rock viscoelastoplastic creep based on double stress-time thresholds[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(2): 125 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张子洋, 曹平, 刘智振, 等. 泥质粉砂岩蠕变特性及非线性蠕变模型研究 [J]. 黄金科学技术, 2022, 30(3): 449 – 459. [ZHANG Ziyang, CAO Ping, LIU Zhizhen, et al. Study on creep characteristics and nonlinear creep model of argillaceous siltstone[J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(3): 449 – 459. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 马民杰. 基于岩石损伤和时间硬化理论的岩石蠕变模拟方法 [J/OL]. 工业建筑, (2022-03-24)[2022-06-03]. <https://doi.org/10.13204/j.gyjzG20122206>. [MA Minjie. Rock creep simulation method based on rock damage and time hardening theory[J/OL]. Industrial Construction, (2022-03-24)[2022-06-03]. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张志强, 朱星宇, 刘新华. 橄榄岩蠕变特性及本构模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1525 – 1535. [ZHANG Zhiqiang, ZHU Xingyu, LIU Xinhua. Study on creep characteristics and constitutive model of peridotite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1525 – 1535. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘振, 杨圣奇, 柏正林, 等. 循环加卸载下闪长玢岩蠕变特性及损伤本构模型 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 143 – 151. [LIU Zhen, YANG Shengqi, BAI Zhenglin, et al. Creep property and damage constitutive model of dioritic porphyrite under cyclic loading-unloading[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 143 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李安润, 邓辉, 王红娟, 等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 106 – 113. [LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 任洋, 王栋, 李天斌, 等. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 65 – 76. [REN Yang, WANG Dong, LI Tianbin, et al. In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an—Xinduqiao section of Sichuan—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 65 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 长江水利委员会长江科学院.《水利水电工程岩石试验规程》: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. [Changjiang River Scientific Research Institute. Code for rock tests in water and

- hydropowerprojects: SL/T 264—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.(in Chinese)]
- [16] 王空前, 谢东武. 不同卸荷路径下的页岩蠕变特性试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(31): 13469 – 13475. [WANG Kongqian, XIE Dongwu. Experimental study on creep characteristics of shale under different unloading paths[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(31): 13469 – 13475. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 燕乔, 娄毅博, 卢红平, 等. 水布垭地下洞室燧石灰岩卸荷蠕变特性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(增刊 1): 121 – 125 [YAN Qiao, LOU Yibo, LU Hongping, et al. Study on the unloading creep properties of strontium limestone in shuibuya underground cavern[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(Sup 1): 121 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 杨帅东, 谭维佳, 方应学. 石英砂岩蠕变力学特性及长期强度研究 [J]. *水力发电*, 2021, 47(4): 43 – 50. [YANG Shuaidong, TAN Weijia, FANG Yingxue. Study on creep mechanical properties and long-term strength of quartz sandstone[J]. *Water Power*, 2021, 47(4): 43 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张俊文, 霍英昊. 深部砂岩分级增量加卸载蠕变特性 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(增刊 2): 661 – 669 [ZHANG Junwen, HUO Yinghao. Creep behavior of deep sandstones under stepwise incremental loading and unloading conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(Sup 2): 661 – 669. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 黄兴, 刘泉声, 康永水, 等. 砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊 1): 2653 – 2662 [HUANG Xing, LIU Quansheng, KANG Yongshui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 1): 2653 – 2662. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 唐志强, 吉锋, 许汉华, 等. 豫南燕山期花岗岩蠕变特性及非线性蠕变损伤模型 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(16): 6421 – 6429. [TANG Zhiqiang, JI Feng, XU Hanhua, et al. Creep characteristics and nonlinear creep damage model of yanshanian granite in southern Henan [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(16): 6421 – 6429. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李祖勇, 杨更社. 基于蠕变试验的冻结红砂岩长期强度研究 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(23): 9976 – 9982. [LI Zuyong, YANG Gengshe. Long-term strength of frozen red sandstone based on creep test[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(23): 9976 – 9982. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张黄梅. 不同卸荷路径下泥岩蠕变特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019 [ZHANG Huangmei. The creep characteristics research of mudstone under different unloading paths[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [24] LI Dejian, LIU Xiaolin, SHAO Yiming, et al. A novel variable-order fractional damage creep model for sandstone[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15: 1073.
- [25] MA Yukun, YAO Qingchen, WANG Junhao, et al. Time-dependent creep constitutive model of roadway surrounding rock based on creep parameters[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 7981192.
- [26] YANG Mengze, HUANG Houxu, YANG Yu. Effect of rock loading rate based on crack extension and propagation[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8755.
- [27] 刘文博, 孙博一, 陈雷, 等. 一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 88 – 95. [LIU Wenbo, SUN Boyi, CHEN Lei, et al. A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 88 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 孙晓明, 缪澄宇, 姜铭, 等. 基于改进西原模型的不同含水率砂岩蠕变实验及理论研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2411 – 2420. [SUN Xiaoming, MIAO Chengyu, JIANG Ming, et al. Experimental and theoretical study on creep behaviors of sandstone with different moisture contents based on modified Nishihara model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2411 – 2420. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王昊. 考虑累积损伤效应的岩石充填节理动态力学特性试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020 [WANG Hao. Dynamic mechanics of rock filled joints considering cumulative damage effects characteristic test research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真