

DOI: 10.11779/CJGE202105007

冻融环境下红砂岩三轴蠕变特性及其模型研究

宋勇军, 张磊涛*, 任建喜, 陈佳星, 车永新, 杨慧敏, 毕冉

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究寒区岩体工程在冻融循环与长期荷载耦合作用下的时效力学特性, 对不同冻融循环条件下的饱和红砂岩进行分级加卸载三轴蠕变试验, 研究冻融循环对岩石蠕变特性的影响。结果表明: 冻融循环对红砂岩蠕变变形的影响与加载应力水平有关。低应力水平下, 岩石黏弹性应变随冻融次数的增加近似线性缓慢增长; 而高应力水平时则呈非线性增长; 黏塑性应变随冻融次数的增加均呈近似线性增长, 第四级加载应力水平 ($70\% \sigma_c$) 为红砂岩蠕变变形特征的分界点。红砂岩稳态蠕变速率随冻融循环次数的增加呈指数型增长。根据红砂岩蠕变试验结果, 建立考虑冻融循环作用影响及蠕变损伤的冻融-损伤蠕变模型, 得到三维应力状态下岩石蠕变本构方程; 对模型进行验证及参数识别, 理论值与试验值吻合较好; 分析了冻融循环作用对模型参数的影响。研究结果为寒区岩体工程的建设及长期稳定性分析提供理论依据。

关键词: 红砂岩; 冻融循环; 分级加卸载蠕变试验; 蠕变特性; 蠕变模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)05-0841-09

作者简介: 宋勇军(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: songyj79@xust.edu.cn。

Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment

SONG Yong-jun, ZHANG Lei-tao, REN Jian-xi, CHEN Jia-xing, CHE Yong-xin, YANG Hui-min, BI Ran

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the time-effectiveness mechanical properties of rock mass engineering in cold regions under the coupling of freeze-thaw cycles and long-term loads, the triaxial multi-level loading and unloading creep tests are carried out on saturated red sandstone under different freeze-thaw cycles. The results show that the effects of freeze-thaw cycles on the creep deformation of red sandstone are related to the loading stress level. At low stress levels, the viscoelastic strain of rock increases approximately linearly and slowly with the increasing freeze-thaw cycles, and at high stress levels, it increases nonlinearly. The viscoplastic strain increases linearly with increasing freeze-thaw cycles. The fourth-level loading stress level ($70\% \sigma_c$) is the boundary point of the creep deformation characteristics of red sandstone. The steady-state creep rate of red sandstone increases exponentially with the increase of the freeze-thaw cycles. Based on the creep test results of the red sandstone, the freeze-thaw-damage creep model considering the effects of freeze-thaw cycles and creep damage is established. The creep equation for rock under three-dimensional stress is obtained. The proposed model is verified and its parameters are identified. The theoretical and experimental data are in good agreement. The influences of freeze-thaw cycles on the model parameters are analyzed. The research results may provide a theoretical basis for the construction of rock mass engineering and long-term stability analysis in cold regions.

Key words: red sandstone; freeze-thaw cycle; multi-level loading and unloading creep test; creep property; creep model

0 引言

随着经济的持续发展, 越来越多的大型岩体工程陆续在高寒地区开工建设, 如寒区隧道、公路以及边坡工程。寒区岩体工程面临季节冻土、高原高寒等复杂地理环境和气候条件, 沿线隧道、路基和边坡等长期经受季节更替、昼夜循环的巨大温度变化, 致使

出现诸如冻胀开裂、冻融滑塌、边坡失稳等不同程度的冻融灾害, 岩体工程的稳定性和安全性受到极大威胁, 给工程建设和后期运营带来严峻的挑战。深入研

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972283, 11872299); 陕西省自然科学基金项目 (2017JM1039)

收稿日期: 2020-08-10

***通信作者 (E-mail: zhanglt95@163.com)**

究冻融环境下岩石的时效力学特性和损伤破坏机制对于寒区岩体工程的建设运营和冻融灾害防治具有重要的理论价值和现实意义。

近年来,众多学者在冻融环境下岩石的力学特性和损伤破坏方面做了大量研究工作。Yamabe等^[1]研究了一次冻融循环后岩石单轴抗压强度随着温度及冻融循环次数的变化规律;Chen等^[2]对不同含水率下的凝灰岩进行冻融循环试验,研究了冻融环境下含水率对岩石强度的影响;Yavuz等^[3]对12种碳酸盐岩开展冻融损伤演化试验,发现冻融后岩样的波速、硬度和抗压强度均出现了不同程度的下降;赖远明等^[4]采用CT检测技术研究了冻融循环次数与CT数和岩石强度的关系;徐光苗等^[5]研究了不同类型岩石的冻融破坏过程及其破坏模式;母剑桥等^[6]研究了冻融循环次数对花岗岩单轴抗压强度的影响规律,并提出了两种冻融劣化模式;韩铁林等^[7]对砂岩进行了冻融循环试验,研究了冻融循环与化学腐蚀共同作用下,岩石的损伤劣化机理;张慧梅等^[8-9]对冻融后的红砂岩、页岩进行力学试验,研究冻融及岩性对岩石力学特性及损伤演化规律的影响,建立了冻融受荷损伤模型以描述岩石冻融受荷损伤演化规律;Lu等^[10]对4例缺陷砂岩进行冻融循环试验和三轴压缩试验,分析了冻融循环对岩石力学特性的影响,并建立冻融砂岩在载荷作用下的损伤演化方程;李新平等^[11]以类岩石材料为对象进行冻融循环及单轴压缩试验,研究了裂隙长度及倾角对岩石力学特性及损伤演化规律的影响。

上述研究在冻融环境下岩石力学特性和损伤机理方面取得了丰富的研究成果。然而实际工程岩体往往处于围岩压力等荷载的长期作用下,而长期荷载作用下岩石的蠕变行为是影响岩体工程长期稳定性、导致岩体工程破坏的重要原因^[12-14]。因此,对冻融环境下岩石在长期荷载作用下的蠕变特性研究十分必要。近年来,已有较多学者对长期荷载作用下岩石的蠕变特性及其模型进行研究。Fabre等^[15]对3种不同岩性的泥岩进行了单轴蠕变试验,研究了岩性对岩石蠕变特性的影响;Tsai等^[16]对弱胶结砂岩进行了蠕变试验,研究了蠕变过程在黏塑性应变与时间的关系;Yang等^[17]对煤岩进行了三轴蠕变试验,研究了围压对岩石蠕变特性的影响;杨秀荣等^[18]对片麻岩进行了不同冻融循环条件下的三轴蠕变试验,研究了冻融循环对岩石蠕变特性的影响;Li等^[19]对冻融后的砂岩进行了蠕变试验,研究了冻融循环对砂岩蠕变变形及孔隙结构的影响;陈国庆等^[20]对砂岩进行了不同冻融循环条件下的蠕变试验,研究了冻融循环环境下,岩石蠕变变形、蠕变速率及长期强度的变化规律,徐卫亚等^[21]提出一个非线性黏塑性元件,建立了能够反映岩石蠕变三阶段的非线性黏弹塑性流变模型;李栋伟等^[22]对不同温度条件下的白垩系软岩进行蠕变试验,提出能够描述冻结软岩蠕变特性的黏弹塑非线性蠕变模型。

综上所述,目前在岩石蠕变特性及模型研究方面已取得一定的研究成果,然而对于冻融岩石在加卸载条件下的蠕变特性以及考虑冻融次数影响的流变模型研究还未见相关报道。基于此,本文以饱和红砂岩为对象,对不同冻融条件下的红砂岩进行三轴分级加卸载蠕变试验,研究冻融循环对岩石蠕变特性的影响,并根据试验结果建立考虑冻融循环次数对岩石蠕变损伤影响的冻融-损伤蠕变模型,可为寒区岩体工程的长期稳定性评价提供理论指导。

综上所述,目前在岩石蠕变特性及模型研究方面已取得一定的研究成果,然而对于冻融岩石在加卸载条件下的蠕变特性以及考虑冻融次数影响的流变模型研究还未见相关报道。基于此,本文以饱和红砂岩为对象,对不同冻融条件下的红砂岩进行三轴分级加卸载蠕变试验,研究冻融循环对岩石蠕变特性的影响,并根据试验结果建立考虑冻融循环次数对岩石蠕变损伤影响的冻融-损伤蠕变模型,可为寒区岩体工程的长期稳定性评价提供理论指导。

1 试验方法

1.1 试样制备

对现场取回的红砂岩岩块进行钻孔取芯,按照国际岩石力学学会试验规程将钻孔取出的岩芯切割、打磨为直径50 mm,高度100 mm,端面平整度不超过0.02 mm的标准岩样,如图1所示。



图1 红砂岩岩样

Fig. 1 Rock samples of red sandstone

试验前先将视觉上差别较大的岩样剔除,而后将其余岩样放入烘箱,在105℃恒温下烘干24 h,待其冷却后测得其干密度和纵波波速。根据纵波波速和干密度相近原则将岩样分为5组,每组8个,共40个。对各组岩样进行真空抽气饱和,抽气压力为0.1 MPa,抽气4 h后在大气压力下静置6 h,取出岩样测得饱和岩样质量,以此得到岩样的饱和密度、饱和含水率和孔隙率,岩样物理参数:纵波波速=1211 m/s,干密度=2.24 g/cm³,饱和密度=2.35 g/cm³,饱和含水率=5.31%,孔隙度=9.6%。

1.2 试验方案

将制备好的饱和红砂岩岩样放入冻融循环试验箱进行冻融循环试验。根据高寒地区昼夜温差变化设定冻融循环温度及高、低温持续时间。冻融循环温度设

定为冻结温度 -20°C , 融解温度 20°C , 冻融温度相互转换的时间间隔为12 h, 每24 h为一个冻融循环周期。根据每次冻融循环后岩石物理力学性质的劣化程度, 分别对不同组别的岩样进行0, 1, 5, 9, 13次冻融循环。

常规三轴压缩试验及三轴加卸载蠕变试验均在TAW-1000岩石三轴蠕变试验机(图2)上进行, 试验室内温度为恒温 25°C 。该试验机由常规三轴、伺服加载、变形监测和数据采集4个单元组成, 其最大轴向荷载可施加至1000 kN, 最大围压为100 MPa。



图2 TAW-1000岩石三轴蠕变试验机及试样安装

Fig. 2 TAW-1000 rock triaxial creep test machine and sample installation

对经历不同冻融循环次数后的红砂岩进行围压分别为0, 2, 4, 6 MPa的常规三轴压缩试验, 得到各岩样三轴抗压强度 σ_c 。而后对各组岩样进行围压分别为0, 2, 4, 6 MPa的分级加卸载蠕变试验。根据常规三轴压缩试验得到的三轴抗压强度值, 确定岩样在各级应力水平下的偏应力值。第一级加载应力 $40\%\sigma_c$, 之后每级加载应力增加 $10\%\sigma_c$, 直至岩样破坏。加卸载方式采用应力控制, 加载速率为 0.01 MPa/s , 每级荷载持续时间2 d后卸载至偏应力为0 MPa, 卸载速率为 0.03 MPa/s , 卸载后持续时间1 d, 而后进行下一级加载, 依次重复, 得到三轴加卸载蠕变曲线。具体加载方式如图3所示。围压为2 MPa时, 不同冻融循环条件下各级偏应力大小如表1所示。

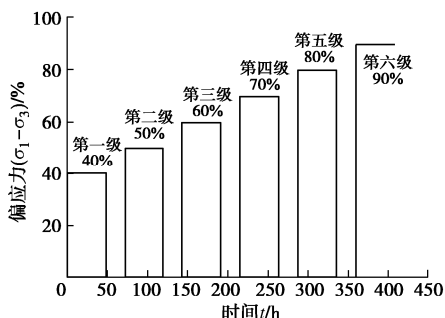


图3 冻融后红砂岩分级加卸载三轴蠕变加载方式

Fig. 3 Multilevel loading and unloading method for triaxial creep tests on red sandstone after freeze-thaw

2 试验结果分析

2.1 分级加卸载蠕变试验结果

因篇幅所限, 本文仅以2 MPa围压下红砂岩分级加卸载蠕变试验结果为例, 说明冻融循环对蠕变特性的影响。图4为2 MPa围压时不同冻融循环条件下红砂岩加卸载蠕变曲线。可以看出, 冻融循环0, 1, 5, 9次后的红砂岩蠕变曲线均表现出3个阶段: 蠕变速率降低(初始蠕变)、蠕变速率恒定(稳态蠕变)和蠕变速率增大(加速蠕变), 而冻融13次后的红砂岩由于冻融循环作用对岩样损伤较大, 加之岩样本身的离散性, 在第五级应力($80\%\sigma_c$)加载过程中就已破坏, 未能呈现加速蠕变阶段。

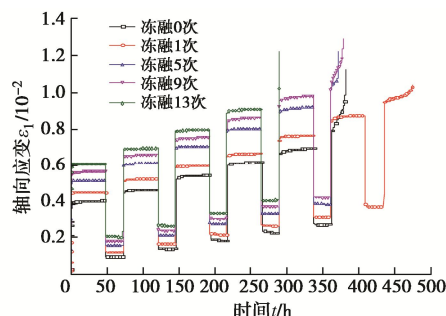


图4 围压为2 MPa时, 不同冻融循环次数后红砂岩加卸载蠕变曲线

Fig. 4 Multi-level loading and unloading creep curves of red sandstone under different freeze-thaw cycles at confining pressure of 2 MPa

除冻融1次和13次的岩样外, 其余岩样均在第六级应力水平($90\%\sigma_c$)下产生加速蠕变阶段直至破坏, 这与Ma等^[23]、Zhao等^[24]的试验结果相似。相同围压条件下, 随着应力水平的增加, 红砂岩瞬时变形及蠕变变形均逐渐增大直至岩样破坏。冻融循环次数的增加对岩石变形有显著影响, 岩样变形随冻融循环次数的增加逐渐增大, 且随着应力水平的增加, 冻融作用对岩样变形的影响愈加显著。

2.2 冻融循环对红砂岩蠕变变形的影响

根据分级加卸载蠕变试验结果可知, 各级应力水平下岩石瞬时应变由瞬弹性应变和考虑加载历史的瞬塑性应变组成, 蠕应变由可恢复的黏弹性应变和不可恢复的黏塑性应变组成。由分级加卸载蠕变数据处理方法得到各级应力水平下岩石的瞬弹、瞬塑、黏弹及黏塑性应变^[25-26]。岩样进入加速蠕变阶段前, 各级应力水平下蠕应变与冻融循环次数的关系如图5所示。可以看出, 相同应力水平条件下, 岩样蠕应变随冻融循环次数的增加逐渐增大。应力水平较小时(低于 $70\%\sigma_c$), 蠕应变随冻融次数的增加近似线性缓慢增

表 1 围压 2 MPa 时, 不同冻融条件下红砂岩三轴蠕变试验中各级偏应力加载值

冻融循环次数 /次	岩样 编号	纵波波速 $V/(m \cdot s^{-1})$	偏应力水平/MPa					
			第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	第六级
0	24-6	1185	8.27	10.34	12.40	14.47	16.54	18.60
1	24-16	1174	7.65	9.57	11.48	13.39	15.30	17.22
5	24-9	1191	7.12	8.90	10.67	12.45	14.23	16.01
9	24-22	1164	6.74	8.43	10.12	11.80	13.49	15.17
13	24-1	1180	6.60	8.26	9.91	11.56	13.21	14.86

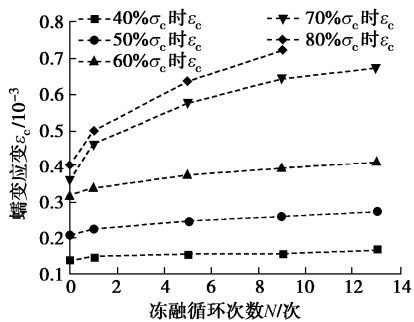


图 5 不同应力水平蠕应变随冻融循环次数变化

Fig. 5 Change of creep strain with number of freeze-thaw cycles under different stress levels

长, 增长幅度较小; 应力水平较大时 (高于 $70\% \sigma_c$), 岩石蠕应变随冻融次数的增加呈非线性增长, 增长幅度较大。如 $50\% \sigma_c$ 应力水平下, 岩样 1 次冻融后蠕应变变为 0.2249×10^{-3} , 9 次冻融循环后为 0.2611×10^{-3} , 增长 16.10%; 而在 $70\% \sigma_c$ 应力水平下, 1, 9 次冻融循环后的蠕应变分别为 0.4598×10^{-3} , 0.6447×10^{-3} , 增长 40.21%。可见冻融循环对岩样蠕变变形有较大影响, 且当蠕变加载应力水平较高时, 冻融产生的影响更为显著, 其中第四级加载应力水平 ($70\% \sigma_c$) 为红砂岩蠕变变形的应力水平分界点。

图 6 为不同应力水平条件下红砂岩黏弹性应变、黏塑性应变与冻融循环次数的关系。可以看出, 相同应力水平条件下, 红砂岩黏弹性应变随冻融循环次数的增加呈逐渐增长的趋势。应力水平较小时, 岩样黏弹性应变随冻融次数的增加近似线性缓慢增长, 增长幅度较小; 而应力水平较大时, 随着冻融循环次数的增加, 岩样黏弹性应变呈非线性增长, 且增长幅度较大, 尤其在第四级加载时较为明显。不同应力水平条件下, 黏塑性应变随冻融次数的增加均表现出较为稳定的增长, 并未因应力水平的升高表现出较为明显的非线性增长。由此可见, 冻融循环作用对岩样黏弹、黏塑性应变均有较大影响, 且应力水平较高时, 冻融循环产生的影响更加显著。

2.3 冻融循环对红砂岩稳态蠕变速率的影响

从图 5 可知, 第四级加载应力水平 ($70\% \sigma_c$) 为

红砂岩蠕变变形的分界点, 即 $70\% \sigma_c$ 应力水平下冻融循环对岩石蠕变变形的影响最为显著, 因而第四级加载应力水平下冻融循环对岩石稳态蠕变速率的影响最为显著。

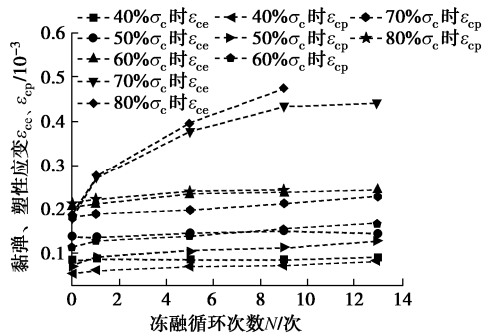


图 6 不同应力水平黏弹、黏塑性应变随冻融循环次数变化

Fig. 6 Changes of viscoelastic and viscoplastic strain with number of freeze-thaw cycles under different stress levels

围压为 2 MPa 时, 不同冻融循环作用后, 第四级加载应力水平下岩石稳态蠕变速率如图 7 所示。可以看出, 在相同围压及相同应力水平条件下, 岩石稳态蠕变速率随着冻融循环次数的增加呈非线性增长。冻融循环次数较小时, 岩石稳态蠕变速率增长幅度较大, 冻融 0 次时, 岩石稳态蠕变速率为 9.8513×10^{-5} , 冻融 1 次后为 1.1203×10^{-4} , 增长 13.72%; 随着冻融循环次数的继续增长, 岩石稳态蠕变速率的增长幅度逐渐减小, 冻融 9 次后岩石稳态蠕变速率为 1.5147×10^{-4} , 而冻融 13 次后为 1.6175×10^{-4} , 增长 6.79%。由此可见, 冻融循环作用对岩石稳态蠕变速率有较大影响。为量化描述岩石稳态蠕变速率与冻融循环次数之间的关系, 对试验结果进行拟合如图 7 所示, $R^2=0.9865$ 拟合结果为

$$\dot{\epsilon}_c = 1.8331 \times 10^{-6} - 8.2663 \times 10^{-7} e^{\frac{N}{9.6592}}, \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}_c$ 为蠕变速率, N 为冻融循环次数。

由图 7 中的拟合曲线及相关系数可以看出, 该指数表达式可以很好的描述岩石稳态蠕变速率与冻融循环次数之间的关系。

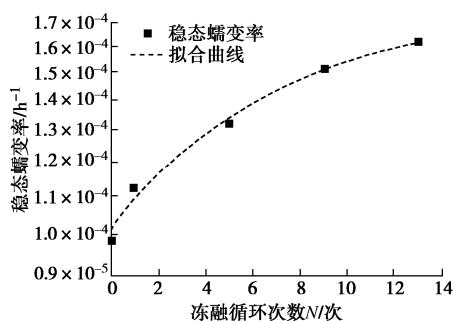


图7 第四级应力水平稳态蠕变速率随冻融循环次数变化

Fig. 7 Change of steady-state creep rate with number of freeze-thaw cycles at fourth stress level

3 红砂岩冻融-损伤蠕变模型

3.1 冻融-损伤蠕变模型的建立

冻融环境下岩石蠕变过程中, 黏性系数不仅受冻融循环次数影响较大, 而且与荷载长期作用下产生的蠕变损伤有关, 尤其在加速蠕变阶段黏性系数与蠕变损伤密切相关。因此, 本文考虑蠕变过程中的损伤积累, 引入损伤变量 D_c 来描述黏性系数在蠕变过程的变化, 结合冻融循环次数对黏性系数的影响, 构建了冻融环境下的冻融-损伤黏性元件, 如图8所示。

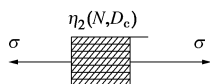


图8 冻融-损伤黏性元件

Fig. 8 Freeze-thaw-damage element

冻融环境下冻融-损伤黏性元件实质是冻融-荷载耦合作用下的 Newton 体, 根据 Newton 黏性定律其本构关系为

$$\sigma = \eta_2(N, D_c) \dot{\epsilon} \quad (2)$$

式中, σ 为冻融-损伤黏性元件的应力, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, $\eta_2(N, D_c)$ 为冻融次数为 N 时, 冻融-损伤黏性元件的黏性系数。考虑冻融循环及荷载长期作用对黏性系数的影响, 有

$$\eta_2(N, D_c) = \eta_2(N)(1 - D_c) \quad (3)$$

其中, $\eta_2(N)$ 为冻融循环次数为 N 时的黏性系数, D_c 为损伤变量, $0 \leq D_c < 1$ 。

近年来, 已有大量研究成果表明^[27-28], 岩石蠕变过程中因荷载长期作用而产生的损伤与时间呈负指数函数关系, 即

$$D_c = 1 - e^{-\alpha t} \quad (4)$$

式中, α 为与红砂岩材料性质及冻融次数相关的系数, t 为时间。因此, 冻融-荷载耦合作用下, 考虑冻融次数及荷载长期作用影响的黏性系数为

$$\eta_2(N, D_c) = \eta_2(N)e^{-\alpha(N)t} \quad (5)$$

式中, $\alpha(N)$ 为冻融次数为 N 时的红砂岩材料系数。

结合式 (2), (5), 得到冻融-损伤黏性元件本构

关系为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\alpha(N)\eta_2(N)} [e^{\alpha(N)t} - 1] \quad (6)$$

根据冻融环境下红砂岩分级加卸载蠕变试验结果及蠕变数据处理方法, 引入冻融-损伤黏性元件, 建立考虑冻融循环及蠕变损伤影响的冻融-损伤蠕变模型, 以描述不同冻融环境下红砂岩黏、弹、塑性蠕变特性。模型由瞬时弹性元件、瞬时塑性元件、黏弹性元件及黏塑性元件 4 部分串联而成, 如图9所示。

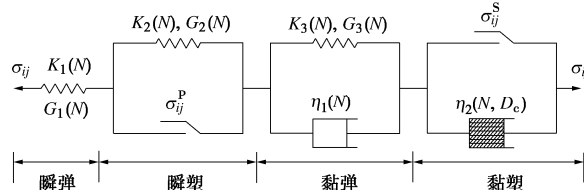


图9 冻融-损伤蠕变模型

Fig. 9 Freeze-thaw-damage creep model

3.2 冻融-损伤蠕变本构方程

根据蠕变试验结果及模型可知瞬弹性元件、瞬塑性元件、黏弹性元件、冻融损伤黏塑性元件的应变分别为 ϵ_{ij}^{me} , ϵ_{ij}^{mp} , ϵ_{ij}^{ce} , ϵ_{ij}^{cp} , 由组合模型的串并联原则得到模型总应变为

$$\epsilon = \epsilon_{ij}^{me} + \epsilon_{ij}^{mp} + \epsilon_{ij}^{ce} + \epsilon_{ij}^{cp} \quad (7)$$

(1) 瞬时弹性元件

对于瞬时弹性元件, 可将其应力张量 σ_{ij} 分解为球应力张量 $\delta_{ij}\sigma_m$ 和偏应力张量 s_{ij} , 即

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\sigma_m + s_{ij} \quad (8)$$

式中, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 球应力张量 $\delta_{ij}\sigma_m$ 只改变物体体积, 偏应力张量 s_{ij} 只改变物体形状, 平均正应力 σ_m 为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ij}}{3} \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

因此, 应变张量也可分解为

$$\epsilon_{ij}^{me} = e_{ij} + \delta_{ij}\epsilon_m \quad (10)$$

式中, e_{ij} 为偏应变张量, $\delta_{ij}\epsilon_m$ 为球应变张量。

由广义 Hooke 定律可知, 瞬时弹性元件的三维本构关系为

$$\left. \begin{aligned} s_{ij} &= 2G_1(N) \cdot e_{ij} \\ \sigma_m &= 3K_1(N) \cdot \epsilon_m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, G 为剪切模量, K 为体积模量。

根据弹性力学知识可知, 剪切模量 G 、体积模量 K 及弹性模量 E 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{E}{2(1+\mu)} \\ K &= \frac{E}{3(1-2\mu)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

结合式(10)、(11),得到瞬时弹性元件的应变为

$$\varepsilon_{ij}^{\text{me}} = \frac{1}{2G_1(N)} s_{ij} + \frac{1}{3K_1(N)} \delta_{ij} \sigma_m \quad (13)$$

(2) 瞬时塑性元件

对于瞬时塑性元件,根据蠕变试验结果可知,各级加载应力水平条件下均有塑性应变产生,得出各级应力水平均大于塑性滑块的应力阈值 σ_{ij}^p ,因而瞬时塑性元件的本构方程可通过类比瞬时弹性的元件的本构方程得出

$$\varepsilon_{ij}^{\text{mp}} = \frac{1}{2G_2(N)} (s_{ij} - s_{ij}^p) + \frac{1}{3K_2(N)} (\delta_{ij} \sigma_m - \delta_{ij} \sigma_m^p) \quad (14)$$

式中, s_{ij}^p , σ_m^p 分别为由应力张量 σ_{ij}^p 分解的偏应力张量和球应力张量,且当 $i=j=1$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m^p &= \frac{\sigma_p}{3}, \\ s_{ij} &= \sigma_p - \sigma_m^p = \frac{2}{3} \sigma_p \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(3) 黏弹性流变元件

对于黏弹性流变元件,其蠕变变形的产生主要由偏应力张量引起,而求应力张量反映的主要是体积应变,引起的蠕变变形可忽略不计,得到三维应力状态下黏弹性流变元件的本构关系为

$$\varepsilon_{ij}^{\text{ce}} = \frac{s_{ij}}{2G_3(N)} \left[1 - e^{-\frac{G_3(N)}{\eta_1(N)} t} \right] \quad (16)$$

(4) 黏塑性流变元件

对于塑性流变元件,在三维应力状态下考虑塑性流动法则,可得黏塑性元件的本构关系为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{cp}} = \frac{e^{\alpha(N)t}}{\eta_2(N)} \left\langle \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (17)$$

式中, F , Q 分别为屈服函数和塑性势函数,且当 $F \geq 0$ 时,由相关流动法则可知, $F=Q$, F_0 为屈服函数初始状态值, $\langle \rangle$ 为开关函数,

$$\left\langle \Phi \frac{F}{F_0} \right\rangle = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) & (F \geq 0) \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) = \left(\frac{F}{F_0} \right)^x$, 岩石材料 x 通常取1。

对式(17)积分,可得

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^{\text{cp}} &= \int_0^t \frac{e^{\alpha(N)t}}{\eta_2(N)} \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} dt \\ &= \frac{1}{\eta_2(N) \alpha(N)} \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} [e^{\alpha(N)t} - 1] \quad (19) \end{aligned}$$

根据 Tresca 屈服准则,将屈服函数定义为

$$F = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{\sigma_s}{2} \quad (20)$$

结合式(7)、(13)、(14)~(16), (19), 得到三维应力状态下冻融-损伤蠕变方程:

当 $F < 0$ 时,有

$$\varepsilon_{ij} = \frac{s_{ij}}{2G_1(N)} + \frac{\delta_{ij} \sigma_m}{3K_1(N)} + \frac{s_{ij} - s_{ij}^p}{2G_2(N)} + \frac{\delta_{ij} \sigma_m - \delta_{ij} \sigma_m^p}{3K_2(N)} + \frac{s_{ij}}{2G_3(N)} \left[1 - e^{-\frac{G_3(N)}{\eta_1(N)} t} \right] \quad (21)$$

当 $F \geq 0$ 时,有

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{s_{ij}}{2G_1(N)} + \frac{\delta_{ij} \sigma_m}{3K_1(N)} + \frac{s_{ij} - s_{ij}^p}{2G_2(N)} + \\ &\quad \frac{\delta_{ij} \sigma_m - \delta_{ij} \sigma_m^p}{3K_2(N)} + \frac{s_{ij}}{2G_3(N)} \left[1 - e^{-\frac{G_3(N)}{\eta_1(N)} t} \right] + \\ &\quad \frac{e^{\alpha(N)t} - 1}{\eta_2(N) \alpha(N)} \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (22) \end{aligned}$$

令式(21)、(22)中 $i=j=1$,三向应力分别为 σ_1 , σ_2 , σ_3 ,且在常规三轴压缩试验中 $\sigma_2 = \sigma_3$,则

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, \\ s_{ij} &= \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{3} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

令屈服函数初始状态为 $F_0=1$,则

$$\begin{aligned} \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \Big|_{F_0=1, i=j=1} &= F \frac{\partial \left[\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \right]}{\partial \sigma_1} \\ &= \frac{1}{4} (\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \quad (24) \end{aligned}$$

由式(21)、(22)结合式(15)、(23)、(24)整理可得三轴应力状态下冻融-损伤轴向蠕变方程:

当 $(\sigma_1 - \sigma_3) < \sigma_s$ 时,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1(N)} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K_1(N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_p}{3G_2(N)} + \\ &\quad \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3 - \sigma_p}{9K_2(N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_3(N)} \left[1 - e^{-\frac{G_3(N)}{\eta_1(N)} t} \right] \quad (25) \end{aligned}$$

当 $(\sigma_1 - \sigma_3) \geq \sigma_s$ 时,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1(N)} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K_1(N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_p}{3G_2(N)} + \\ &\quad \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3 - \sigma_p}{9K_2(N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_3(N)} \left[1 - e^{-\frac{G_3(N)}{\eta_1(N)} t} \right] + \\ &\quad \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{4\eta_2(N) \alpha(N)} [e^{\alpha(N)t} - 1] \quad (26) \end{aligned}$$

3.3 模型验证及参数辨识

根据三维应力状态下的蠕变本构方程,对蠕变试验结果进行参数识别。目前,在非线性问题模型参数

表 2 围压 2 MPa 时, 冻融 5 次后模型参数

Table 2 Model parameters after 5 freeze-thaw cycles at confining pressure of 2 MPa									
偏应力 /MPa	$K_1(N)$ /GPa	$G_1(N)$ /GPa	$K_2(N)$ /GPa	$G_2(N)$ /GPa	$G_3(N)$ /GPa	$\eta_1(N)$ /(GPa·h ⁻¹)	$\eta_2(N)$ /(GPa·h ⁻¹)	$\alpha(N)$	R^2
7.12	0.823	0.706	10.248	8.679	27.914	35.707			0.9803
8.90	0.892	0.681	11.358	7.761	29.650	31.068			0.9453
10.67	1.014	0.678	12.033	6.435	33.722	29.147			0.9719
12.45	1.152	0.660	13.714	5.726	26.912	37.183			0.9486
14.23	1.302	0.640	14.847	4.895	27.377	38.027			0.9935
16.01	1.354	0.631	15.628	4.120	26.642	35.014	11.587	0.286	0.9524

识别中, 最小二乘法是使用最为普遍的方法之一, 且其中最常用的是 Levenberg-Marquarat (L-M)算法。

L-M 算法是介于 Newton 法与梯度下降法之间的一种改进非线性优化算法, 该方法不仅同时拥有 Newton 法的快速收敛性和梯度下降法的全局搜索特性, 而且克服了奇异矩阵无法继续迭代的缺点, 使其在解决非线性问题时表现良好。然而, L-M 算法对初值的合理性要求较高, 如果给出的初值偏差较大会导致辨识效果不太理想。因此, 本文采用内置通用全局优化算法(Universal Global Optimization)的数值优化计算软件 1stOpt 进行参数识别, 解决了 L-M 算法对初值的依赖问题, 拟合结果精准度更高。对 2 MPa 围压时, 不同冻融循环条件下红砂岩蠕变结果进行参数辨识, 得到各应力水平下的模型参数及拟合结果, 因篇幅所限, 此处仅给出 2 MPa 围压下 5 次冻融循环后的模型参数和拟合结果, 如表 2 和图 10 所示。

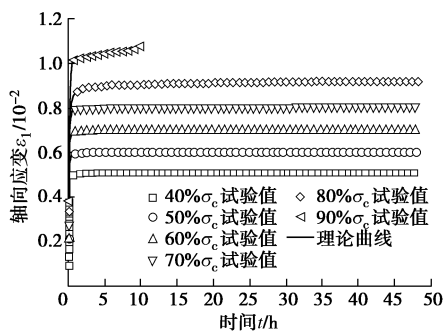


图 10 冻融 5 次, 围压 2 MPa 条件下, 各级蠕变试验结果及模型理论曲线

Fig. 10 Creep data and model curves at various levels under 5 freeze-thaw cycles at confining pressure of 2 MPa

从图 10 可以看出, 模型理论曲线与蠕变试验结果一致性较高, 拟合后相关系数基本在 0.95 以上, 模型能很好地反映不同冻融环境下岩石的各个蠕变阶段。

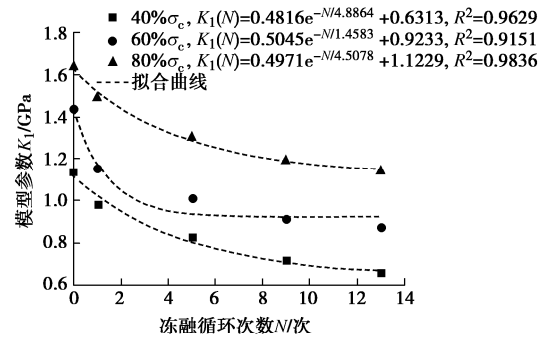
3.4 冻融循环对模型参数的影响

从表 2 可以看出, 围压及冻融次数恒定时, 随着加载应力水平的增加, $K_1(N)$, $K_2(N)$ 逐渐增大, $G_1(N)$, $G_2(N)$ 有所减小, $G_3(N)$, $\eta_2(N)$ 无明显变化规律, 表明应力水平的增加对岩石瞬时变形影响较

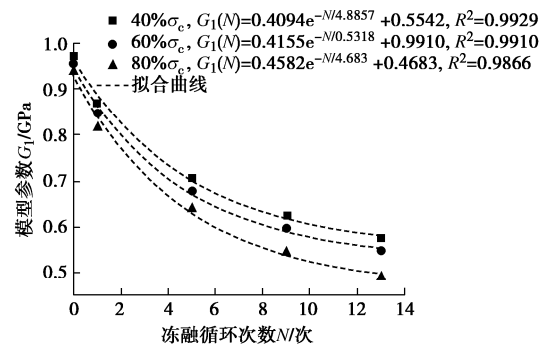
大, 而对蠕变变形影响较小。

为研究不同应力水平条件下冻融次数对模型参数的影响规律, 对加载应力为 40% σ_c , 60% σ_c , 80% σ_c 时, 模型参数与冻融次数的关系进行拟合, 如图 11 所示。

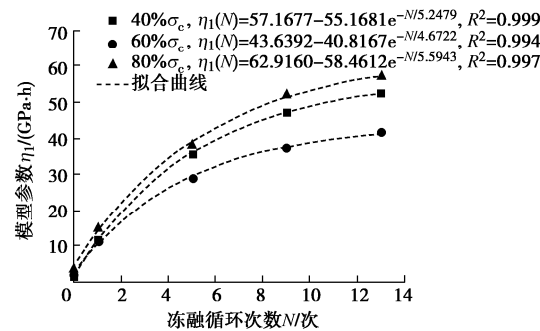
从图 11 可以看出, 不同应力水平条件下, 各参数均随冻融次数的增加呈指数型降低, 而黏性系数 $\eta_1(N)$ 却呈指数型增长, 表明冻融循环对岩石瞬时及蠕变变形均有较大影响, 且随着冻融循环次数的增加, 其影响逐渐趋于稳定。



(a) 体积模量 $K_1(N)$



(b) 变形模量 $G_1(N)$



(c) 黏性系数 $\eta_1(N)$

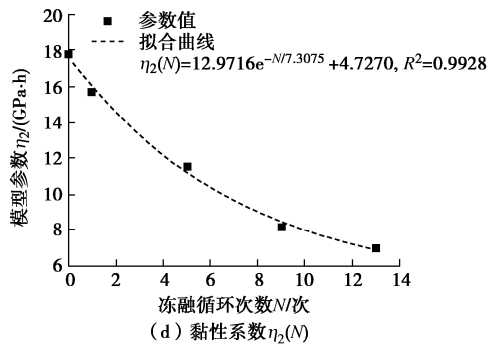


图 11 不同应力水平条件下, 蠕变模型各参数与冻融循环次数的关系曲线

Fig. 11 Curves of parameters of creep model versus number of freeze-thaw cycles under different stress levels

4 结 论

本文通过不同冻融环境下红砂岩三轴分级加卸载蠕变试验, 构建了考虑冻融循环次数对岩石蠕变特性影响的三维蠕变模型, 得到 4 点结论。

(1) 冻融循环对红砂岩蠕变变形的影响与加载应力水平有关。低应力水平下, 岩石总蠕应变随冻融次数的增加近似线性缓慢增长; 而高应力水平时则呈非线性增长, 第四级加载应力水平 ($70\%\sigma_c$) 为红砂岩蠕变变形特征的分界点, 黏弹性应变随冻融次数的变化规律与总蠕变相似, 而黏塑性应变随冻融次数的增加均呈近似线性增长。

(2) 岩石稳态蠕变速率受冻融循环影响较大。围压相同时, 红砂岩稳态蠕变速率随冻融循环次数的增加呈指数型增长。

(3) 考虑冻融循环作用及蠕变损伤对岩石蠕变特性的影响, 建立了能够反映红砂岩黏弹塑性变形及各蠕变阶段的冻融-损伤蠕变模型, 推导了三维应力状态下的蠕变本构方程。对模型进行了验证及参数识别, 理论值与试验值吻合较好。

(4) 冻融循环对模型参数影响较大。不同应力水平条件下, 各参数均随冻融循环次数的增加呈指数型降低, 而黏性系数 $\eta_1(N)$ 却呈指数型增大。

参考文献:

- [1] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(7): 1029 - 1034.
- [2] CHEN T C, YEUNG M R, MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **38**(2/3): 127 -

136.

- [3] YAVUZ H, ALTINDAG R, SARAC S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(5): 767 - 775.
- [4] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的 CT 分析[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(3): 206 - 210. (LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. CT Analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the Daban Mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(3): 206 - 210. (in Chinese))
- [5] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3076 - 3082. (XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3076 - 3082. (in Chinese))
- [6] 母剑桥, 裴向军, 黄 勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, **21**(1): 103 - 108. (MU Jian-qiao, PEI Xiang-jun, HUANG Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing action[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(1): 103 - 108. (in Chinese))
- [7] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生. 砂岩在化学腐蚀和冻融循环共同作用下力学特征劣化的试验研究[J]. 水利学报, 2016, **47**(5): 644 - 655. (HAN Tie-lin, SHI Jun-ping, CHEN Yun-sheng. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of sandstone under the combined action between water chemical corrosion and freezing and thawing cycles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(5): 644 - 655. (in Chinese))
- [8] 张慧梅, 杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011, **40**(1): 140 - 151. (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Freeze-thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, **40**(1): 140 - 151. (in Chinese))
- [9] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 471 - 476. (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2010, **29**(3): 471 – 476. (in Chinese))
- [10] LU Y, LI X, CHAN A. Damage constitutive model of single flaw sandstone under freeze-thaw and load[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **159**: 20 – 28.
- [11] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2308 – 2315. (LI Xin-ping, LU Ya-ni, WENG Yang-jun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2308 – 2315. (in Chinese))
- [12] SHAO J F, ZHU Q Z, SU K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**: 549 – 555.
- [13] SHALABI F I. Analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**: 271 – 279.
- [14] STERPI D, GIODA G. Visco-plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, **42**: 319 – 339.
- [15] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**: 950 – 960.
- [16] TSAI L S, HSIEH Y M, WENG M C. Time-dependent deformation behaviors of weak sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**: 144 – 154.
- [17] YANG S Q, JING H W, CHENG L. Influences of pore pressure on short-term and creep mechanical behavior of red sandstone[J]. Engineering Geology, 2014, **179**: 10 – 23
- [18] 杨秀荣, 姜谟男, 王善勇, 等. 冻融循环条件下片麻岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(11): 4331 – 4340. (YANG Xiu-rong, JIANG An-nan, WANG Shan-yong, et al. Experimental study on creep characteristics of gneiss under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(11): 4331 – 4340. (in Chinese))
- [19] LI J, ZHU L, ZHOU K, et al. Experimental investigation on the effects of ambient freeze-thaw cycling on creep mechanical properties of sandstone under step loading[J]. IEEE Access, 2019(7): 108513 – 108520.
- [20] 陈国庆, 郭帆, 王剑超, 等. 冻融后石英砂岩三轴蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊 1): 203 – 210. (CHEN Guo-qing, GUO Fan, WANG Jian-chao, et al. Experimental study of creep properties of quartz sandstone after freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S1): 203 – 210. (in Chinese))
- [21] 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]. 岩土力学与工程学报, 2006, **25**(3): 433 – 447. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, CHU Wei-jiang. 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))
- [22] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 398 – 403. (LI Dong-wei, WANG Ren-he, FAN Ju-hong. Nonlinear rheological model for frozen soft rock during Cretaceous period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 398 – 403. (in Chinese))
- [23] MA L, DAEMEN J J K. An experimental study on creep of welded tuff[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(2): 282 – 291.
- [24] ZHAO Y, ZHANG L, WANG W, et al. Creep behavior of intact and cracked limestone under multi-level loading and unloading cycles[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(6): 1409 – 1424.
- [25] SONG Y, ZHANG L, YANG H, et al. Experimental study on the creep behavior of red sandstone under low temperatures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 1 – 10.
- [26] 夏才初, 钟时猷. 考虑加载历史影响的蠕变试验数据整理方法[J]. 中南矿冶学院学报, 1989, **20**(1): 22 – 28. (XIA Cai-chu, ZHONG Shi-you. Experimental data processing method in consideration of influence of loading history on rock specimen deformation[J]. Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy, 1989, **20**(1): 22 – 28. (in Chinese))
- [27] 周宏伟, 王春萍, 段志强, 等. 基于分数阶导数的盐岩流变本构模型[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, **42**(3): 310 – 318. (ZHOU Hong-wei, WANG Chun-ping, DUAN Zhi-qiang, et al. Time-based fractional derivative approach to creep constitutive model of salt rock[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronmica, 2012, **42**(3): 310 – 318. (in Chinese))
- [28] SANJAY K S, SHRAWAN K G, NAGARATNAM S. Active earth pressures on retaining wall for $c-\phi$ soil backfill under seismic loading condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(5): 690 – 696.