

DOI: 10.11779/CJGE202108011

冻融后不同含水率红砂岩三轴蠕变特性及损伤模型研究

万 亿¹, 陈国庆^{1*}, 孙 祥¹, 张广泽²

(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. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对寒区自然环境对岩体长期稳定性的影响, 以川藏铁路沿线的红砂岩为研究对象, 对不同含水率的岩样进行了冻融后核磁共振检测及三轴蠕变试验。试验结果表明, 含水率的增加促进了冻融循环过程中红砂岩内各尺寸孔隙的发育扩展, 且冻融后红砂岩中孔的发育程度最高; 在长期荷载作用下, 冻融后红砂岩的时效变形特征呈现明显的软化趋势, 随着含水率的增加, 冻融后红砂岩的蠕变量及蠕变速率随之增大, 而荷载等级及长期强度显著降低, 破坏断面由单一剪切向张拉劈裂型逐渐演变。根据试验结果, 基于损伤力学原理建立一种考虑冻融及含水劣化的西原模型, 并通过弹塑性力学理论将其扩展为三维形式, 采用通用全局优化算法对模型进行参数辨识, 借此揭示了模型参数及劣化系数随冻融循环次数及含水率的变化规律。通过 FLAC^{3D} 岩石三轴蠕变仿真模拟, 验证模型能较好地反映冻融后不同含水率红砂岩全阶段蠕变特征。研究结果可为川藏线寒区岩土工程长期稳定性提供科学依据及技术参考。

关键词: 红砂岩; 三轴蠕变; 损伤力学; 本构模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)08-1463-10

作者简介: 万 亿(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: 470536212@qq.com。

Triaxial creep characteristics and damage model for red sandstone subjected to freeze-thaw cycles under different water contents

WAN Yi¹, CHEN Guo-qing¹, SUN Xiang¹, ZHANG Guang-ze²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In view of the influences of the natural environment in cold regions on the long-term stability of rock mass, the red sandstone samples along Sichuan-Tibet railway are taken as the research object, and the nuclear magnetic resonance and triaxial creep experiments are conducted on the samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents. The experimental results show that the increase of water content promotes the development and expansion of pores in red sandstone during freeze-thaw cycles, and the development degree of mesopore in red sandstone after freeze-thaw cycles is the highest. The time-dependent deformation characteristics of red sandstone after freeze-thaw cycles present obvious softening trend, and the creep strain and rate of red sandstone subjected to freeze-thaw cycles increase with the increase of water content, while the load capacity and the long-term strength decrease significantly, and the fracture surface evolves from single shear to tension splitting gradually. According to the experimental results, a modified Nishihara model considering freeze-thaw damage and water deterioration is proposed based on the principle of damage mechanics, which is further extended to a three-dimensional creep constitutive equation based on the elastoplastic mechanics. The parameters of the model are identified by using the universal global algorithm with the creep data, and the variation trend of the parameters and deterioration coefficients with the number of freeze-thaw cycles and water content is revealed. Finally, the model is written into FLAC^{3D} to realize the numerical simulation of triaxial creep experiments of rock, and it is verified that the model can well reflect the creep characteristics at all creep stages of red sandstone subjected to freeze-thaw cycles under different water contents. The research results can provide scientific basis and technical reference for the long-term stability of geotechnical engineering in cold regions along Sichuan-Tibet highway.

Key words: red sandstone; triaxial creep; damage mechanics; constitutive model

0 引 言

川藏铁路东起四川省成都市, 西至西藏自治区拉

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972284, 41521002); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2020010(20-21))

收稿日期: 2020-12-25

*通信作者(E-mail: chgq1982@126.com)

萨市,是继青藏铁路后国内第二条进藏铁路。川藏铁路全线海拔升降显著,途经区域温差较大,山体地质灾害发生频繁^[1]。对于铁路沿线边坡岩体而言,昼夜温差及季节性气候变化引起的冻融循环对边坡岩体造成的损伤,以及冰川水、地下水及雨水等外部环境的变化引起岩体内水量的改变,间接影响着边坡的长期稳定性,由此给铁路工程带来了巨大隐患。而这种影响的根本原因建立在冻融循环作用及含水率变化下,岩体时效力学性能发生劣化。

近年来,众多国内外学者聚焦于岩石在冻融循环条件下的物理力学特性及损伤演化机制^[2-6],在试验分析、量化评价及工程实践方面取得了丰富的研究成果。针对于不同含水率岩石在冻融作用下的力学响应及劣化效应,相关研究基于波速测试、单轴与三轴压缩、剪切及拉伸试验等,分析了不同含水率与冻融循环次数对于岩石波速、变形、强度及破坏特征的影响^[7-11]。目前,冻融循环作用下岩石蠕变特性研究愈发引起人们的重视。相关学者通过对经历不同冻融循环次数的石英砂岩^[12]、炭质页岩^[13]、片麻岩^[14]及花岗岩^[15]等进行蠕变试验,探讨了冻融循环次数对岩石蠕变变形特征、长期力学性能及蠕变破坏形态的影响,并根据试验结果,提出冻融损伤元件与损伤演化方程,基此建立了冻融岩石蠕变损伤模型。研究指出,冻融循环作用对岩石蠕变具有显著影响,其导致了岩石长期力学性能弱化,蠕变变形软化,破坏形态向更破裂的方式演变。然而,目前的研究主要集中于冻融作用下饱和岩石的蠕变特性,对于不同含水率岩石在冻融作用下的时效性力学问题有待进一步提升。

岩石蠕变模型作为表征岩石蠕变特性的主要途径,其既以试验为基础,同时也是数值模拟的基本组成部分^[16-19]。鉴于此,本文以川藏线红砂岩为研究对象,通过对不同含水率红砂岩开展冻融后核磁共振检测及三轴蠕变试验,深入讨论红砂岩在不同含水率及冻融作用下的细观损伤特征及蠕变力学行为。基于试验研究结果,构建考虑冻融及含水劣化的西原模型,并运用 FLAC^{3D} 实现模型二次开发及仿真模拟。研究结果发现,含水率的变化深刻影响了冻融红砂岩的损伤演变规律及蠕变劣化特性。

1 试验制备及方案

1.1 试样制备

试验所采用的红砂岩选自于川藏线雅安至巴塘路段,表面无明显节理。密封运回实验室后按照国际岩石力学学会(ISRM)试验规程将其制备成 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准岩样。加工完后选取完整性较好的岩石进行声波测量,根据试样的波速差异进一步筛选均

一性较好的岩样进行试验。

1.2 试验方案

红砂岩试样的饱和含水率为4.63%,采用岩石质量控制法^[9]制备含水率为0%,1%,2%,3%及饱和等5种不同含水条件的红砂岩试样。

将制备好的不同含水率红砂岩试样放入全自动冻融测试箱内进行冻融循环试验,试验相关指标设计以文献^[20]为参考。设定冻融温差为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$,冻融时长为冻结1 h,融化1 h,即每2 h为一次循环,冻融循环总次数为60次。当冻融时长达到30次冻融循环时取出第一批试样,达到60次冻融循环时取出第二批岩样,即对不同组别的红砂岩试样进行0次、30次与60次冻融循环处理。

为探究冻融循环次数及含水率对红砂岩细观结构的影响,对冻融后不同含水率红砂岩进行核磁共振检测,试验仪器采用 MacroMR12-150H-I 核磁共振分析系统,该仪器通过 CPMG 脉冲序列进行横向弛豫时间(T_2)测试,试验采用共振频率为12.803 MHz,线圈探头直径为60 mm,主磁场强度为 $0.3 \pm 0.05\text{ T}$,磁体温度范围控制在 $32.00 \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 之间。

冻融循环试验结束后,将试样放入 YSJ-01-00 三轴流变仪^[12]中进行三轴蠕变试验。试验采用分级加载法对试样进行隔天加载,设定围压5 MPa,每级加载应力20.4 MPa,加载速率1 MPa/min,每级荷载加至预定值后稳定24 h,保证24 h后岩样的位移小于0.01 mm/h 再进行下级加载。如此逐级施加直至试样破坏,在整个过程中连续记录试样的应力、应变及时间数据。

2 细观结构损伤特征

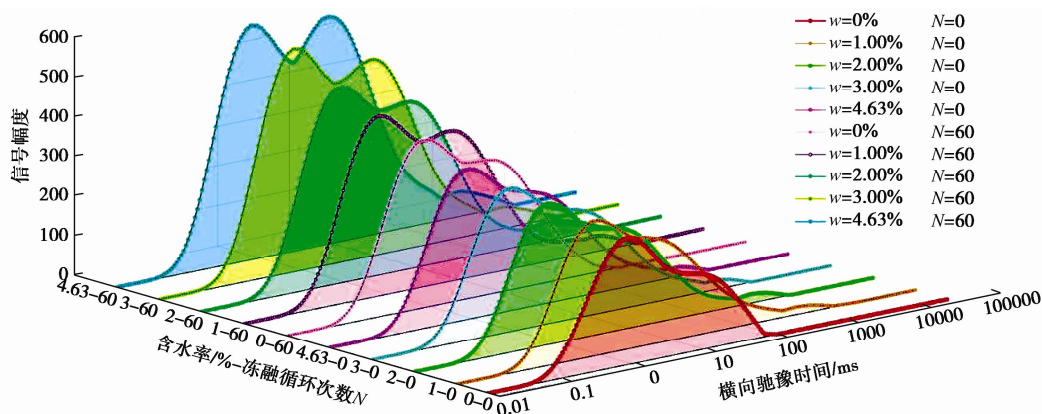
2.1 核磁共振测试结果

在核磁共振测试中,磁共振信号强度代表被测样品中含氢流体的量,而磁共振信号强度随时间变化的快慢(弛豫时间)与流体中分子的赋存状态有关,分析饱水岩石中含氢流体的弛豫特征可全面反映岩石内部孔隙的分布规律。对于岩石中的含氢流体,其在射频脉冲作用后的横向弛豫时间 T_2 为

$$\frac{1}{T_2} = \rho \left(\frac{S}{V} \right), \quad (1)$$

式中, ρ 为横向表面弛豫强度,与岩石颗粒表面及胶结物的性质有关, S/V 为岩石内孔隙的比表面积,与孔隙的形状有关,如球形孔隙取 $6/d$ (d 为直径)。从取值意义来看, T_2 与岩石孔隙大小具有一一对应的关系,故通过观测岩石 T_2 的分布特征可间接得到岩石内不同尺寸孔隙的分布规律。

图1给出了含水率为0%,1%,2%,3%及4.63%(饱和)的红砂岩在经历0次及60次冻融循环后的

图1 冻融循环条件下不同含水率红砂岩 T_2 谱分布情况Fig. 1 T_2 distribution of red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents

T_2 谱分布曲线。从图中可看出, 干燥红砂岩的 T_2 谱曲线由两个谱峰组成, 而含水红砂岩 T_2 谱分布表现为 3 个谱峰, 表明在饱水过程中水溶解了红砂岩中的可溶性矿物, 使红砂岩内部分孔隙扩展贯通形成相对更大尺寸孔径的孔隙。在 0~60 次冻融循环过程中, 红砂岩 T_2 谱曲线的每个谱峰对应的信号幅度均呈上升趋势, 其中第一与第二谱峰的上升幅度最为明显, 表明试样以中小尺寸孔径孔隙的快速发育为主。在无冻融循环条件下, 试样的 T_2 谱曲线随含水率的增加无明显变化。在冻融 60 次后, 含水率越高的红砂岩其 T_2 谱整体的上升幅度越大, 其中又以第二谱峰的增长幅度最高。反映出含水率的增加促进了冻融循环过程中岩石内各尺寸孔隙的发育扩展, 且各尺寸孔隙的发育程度为中孔 > 小孔 > 大孔。

2.2 含水率控制下的冻融损伤机制分析

相关研究指出^[5], 砂岩的冻融损伤是毛细管机制、结晶压机制、静水压机制及体积膨胀机制共同作用下的结果, 而各损伤机制作用又与砂岩的孔隙分布特征密切相关。针对红砂岩的孔隙分布特征 (以主干—旁枝型结构表示), 笔者认为毛细管及结晶压机制是红砂岩产生冻融损伤的主控因素, 该损伤理论要求有充分的水在主干孔中结冰并生长至次级孔, 在含水率低的情况下, 大部分水通过未冻水膜迁移至主干孔中结冰, 冰生长至一定体积后即停止, 这时基于毛细管机制及结晶压机制的冻融损伤作用受到抑制, 因此低含水率 (如 $w=1\%$ 时) 红砂岩冻融后 T_2 谱上升幅度受限。当含水率增加时, 冰生长有足够的未冻水源补给, 大部分水结冰生长至次级孔后挤压孔隙壁对岩石造成损伤, 这时产生的有效冻融损伤程度较高, 故高含水率 (如 $w=3\%$ 及 $w=4.63\%$ 时) 红砂岩冻融后 T_2 谱大幅上涨。静水压及体积膨胀机制同样在红砂岩冻融损伤中起一定作用, 静水压是由于结冰驱动未冻水渗流形

成的损伤, 而体积膨胀机制是结冰膨胀产生冰压力形成的损伤, 该理论均以水作为主要的损伤诱发因子, 因此, 含水率的变化对该理论控制下的冻融损伤发展影响不言而喻。综上所述, 含水率的增加 (减少) 增强 (抑制) 了岩石的冻融损伤程度, 即含水率控制了砂岩在冻融过程中其细观孔隙结构的演变特征 (图 2)。

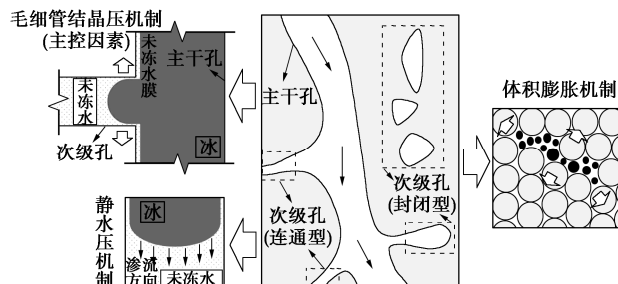


图2 冻融损伤机制示意图

Fig. 2 Freeze-thaw damage mechanism

3 三轴蠕变试验结果

3.1 蠕变特征

(1) 蠕变变形

图 3 为冻融后不同含水率红砂岩的全过程蠕变曲线。对比图 3 (a) ~ (c) 可知, 当红砂岩处于相同含水率状态时, 试样所承受的荷载等级随着冻融循环次数的增加而降低, 而在每一级荷载作用下的蠕变量随之增加, 该现象与之前的研究结果一致^[12], 即试样的时效变形特征受冻融作用影响呈明显的软化趋势。随着含水率的增加: ①经历相同冻融循环次数的试样所承受的荷载等级随之降低; ②在非屈服应力下, 相同冻融循环及偏应力下试样的蠕变量随之递增, 且破坏前累计的变形量普遍随之增加; ③在屈服应力下, 经历冻融循环次数越多的红砂岩蠕变时间越长。

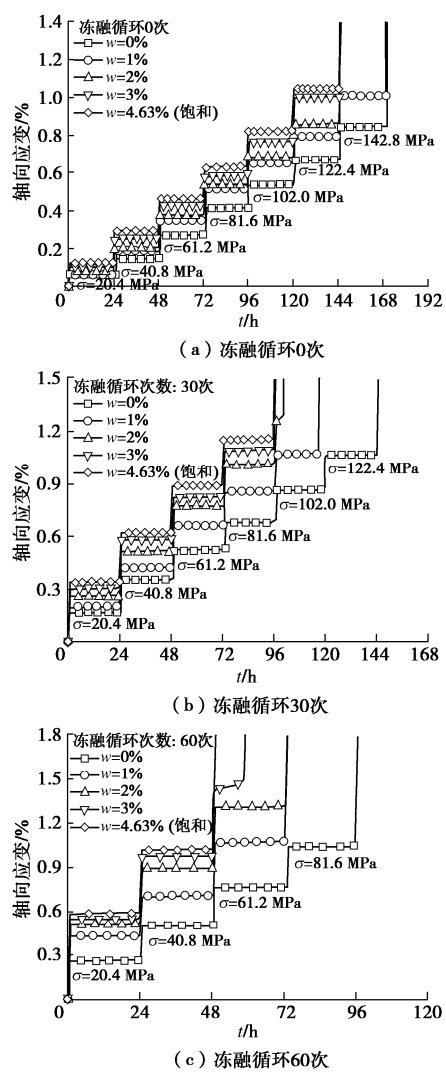


图 3 冻融后不同含水率红砂岩全过程蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of red sandstone after freeze-thaw cycles under different water contents

(2) 蠕变速率及加速度

图 4 给出了冻融后不同含水率红砂岩的蠕变速率及加速度曲线。在非屈服应力条件下,红砂岩的蠕变速率曲线整体呈“L”型,由图 4(a)可见,试样在加载初期变形速率达到最大,随着时间增加速率逐渐减小至近似为 0,表明试样从衰减蠕变阶段过渡到稳态蠕变阶段。随着含水率的增加,冻融后红砂岩的蠕变速率随之增大,且速率跌落至稳定的时间点 t_w 向右偏移,表明试样在衰减蠕变阶段的变形持续时长随之递增。红砂岩的蠕变加速度曲线呈“Γ”型,加速度随时间及含水率增加的变化规律与速率相似,除含水率为 1% 的试样在衰减蠕变初期的蠕变加速度绝对值最小,其余时刻试样蠕变加速度基本与含水率呈正相关。在屈服应力条件下,红砂岩在蠕变过程中历经三个蠕变阶段,如图 4(b)所示。试样的蠕变速率及加速度在各蠕变阶段的演变规律为:①衰减蠕变阶段, $a < 0$, 速率逐渐降低;②稳态蠕变阶段, $a = 0$, 速

率保持恒定;③加速蠕变阶段, $a > 0$, 速率快速激增。加速度持续趋于 0 的时间极限为岩石失稳破坏的时间节点,冻融 60 次含水率为 3% 的红砂岩失稳节点明显晚于冻融 30 次含水率为 2% 的红砂岩,但前者整体的速率及加速度绝对值更大,屈服时的偏应力更低。

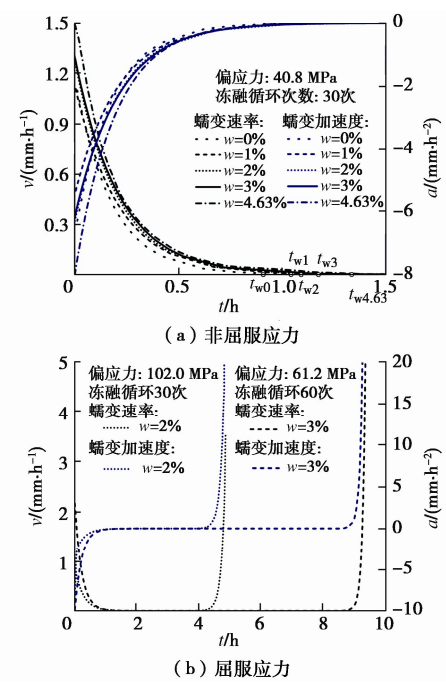


图 4 冻融后不同含水率红砂岩蠕变速率及加速度曲线

Fig. 4 Creep rate and acceleration curves of red sandstone after freeze-thaw cycles under different water contents

3.2 长期强度

岩石的长期强度是指使岩石不发生非稳定变形的最大长期荷载,当应力水平超过该值时,岩石将发生蠕变破坏。本文采用稳态蠕变速率法^[21]计算冻融后不同含水率红砂岩的长期强度,结果如表 1 所示。在含水率一定时,红砂岩的长期强度随着冻融循环次数的增加而降低,反映出其时效力学性能逐渐弱化。含水率的变化主要决定了冻融后红砂岩长期强度的下降幅度,如相比干燥无冻融红砂岩的长期强度,冻融 60 次后干燥红砂岩的强度下降了 39.8%,而含水率为 2% 时下降幅度为 56.8%,饱和时达到了 77.3%。由此可见,较高含水率红砂岩经历冻融循环后,其抵御长期荷载能力大幅下降。

表 1 冻融后不同含水率红砂岩长期强度

Table 1 Long-term strengths of red sandstone after freeze-thaw cycles under different water contents					
冻融循环次数	不同含水率红砂岩的长期强度/MPa				
	干燥	1%	2%	3%	饱和
0	124.69	124.03	104.81	102.48	101.32
30	113.90	89.73	85.11	65.51	66.02
60	75.02	55.71	53.87	48.67	28.32

3.3 宏观破坏形态

图5给出了冻融60次后不同含水率红砂岩的蠕变破坏形态, 由图5可知, 当试样干燥时, 试样破坏仅有一条贯穿整体的斜剪切面, 剪切面两侧试样较为完整; 在含水率为1%时, 除了试样破坏呈现一斜剪切面外, 断面下方发育有一条非贯穿式主裂纹, 且附近有部分岩块剥落; 在含水率为2%及3%时, 试样表面有两组贯穿式主裂纹, 为张拉劈裂型, 且主裂纹附近伴随有许多次裂纹, 含水率越高, 次裂纹的延伸尺度越大; 在含水率为饱和时, 试样断面出现多组次裂纹贯通, 主裂缝附近有大面积岩块脱落, 试样破裂程度较为严重。根据主裂纹的类型, 试样破坏可归纳为断面由单一斜剪切向张拉劈裂型逐渐演变至断面附近岩块崩解碎裂。

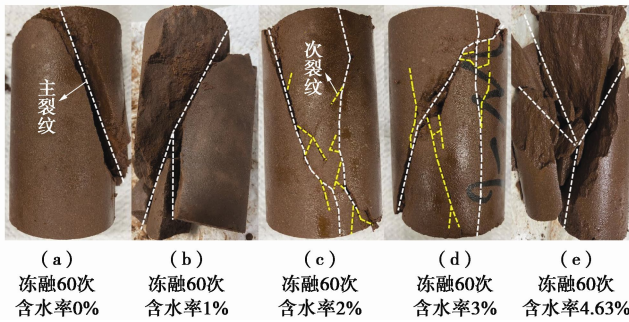


图5 冻融后不同含水率红砂岩蠕变破坏形态

Fig. 5 Creep failure modes of red sandstone after freeze-thaw cycles under different water contents

4 冻融含水劣化蠕变模型

4.1 冻融含水劣化系数及损伤演化方程

上述试验结果表明, 冻融循环次数与含水率变化共同影响了红砂岩的蠕变力学特性, 且影响深度涉及红砂岩在衰减、稳态及加速蠕变阶段的时效变形特征。从定性的角度分析, 含水率及冻融循环对红砂岩蠕变特性的影响可描述为岩石在各蠕变阶段的变形特征随岩石在含水率控制下的冻融损伤程度而发生改变。从定量的角度评价, 则可考虑描述岩石各蠕变阶段变形行为的力学元件具有随冻融循环次数及含水率变化的非定常性。

基于此, 从损伤力学的观点出发, 通过建立考虑冻融及含水劣化的岩石黏弹性特征参数表达式, 并提出时效性损伤演化方程, 为构建蠕变损伤模型作铺垫以进一步量化探讨红砂岩在冻融循环次数及含水率变化下的蠕变劣化性质。

首先, 考虑描述岩石黏弹性变形的特征参数具有随冻融循环次数及含水率变化的非定常性, 即

$$E(N, \omega) = D_e(N, \omega)E_0, \quad (2)$$

$$\eta(N, \omega) = D_\eta(N, \omega)\eta_0. \quad (3)$$

式中 $E(N, \omega)$, $\eta(N, \omega)$ 分别为冻融含水状态下的弹性模型与黏性系数; E_0 , η_0 分别为无冻融干燥状态下的弹性模量与黏性系数; $D_e(N, \omega)$, $D_\eta(N, \omega)$ 分别为弹性冻融含水劣化系数及黏性冻融含水劣化系数, 均为关于冻融循环 N 及含水率 ω 的二元函数。

其次, 由于岩石是由不同矿物晶体所组成的固态集合体, 内部结构有缺陷, 在空间上呈现非均质性。因此, 在长期受荷过程中, 岩石微细观结构的改变(包含晶粒的位移, 孔隙的发育及扩展等)具有基于时间效应的概率性, 反映了微细观损伤的累计具有随时间变化的随机分布特征。考虑到损伤随时间的发展为一连续过程, 定义岩石时效损伤的累计服从 Weibull 连续型概率分布, 即

$$y(t) = \frac{\theta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\theta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\theta \right]. \quad (4)$$

式中 $y(t)$ 为时效损伤密度函数; θ 与 λ 为表征材料时效损伤演化规律的特征参数。损伤密度函数为时效损伤率在时间上的度量, 因此时效损伤函数为

$$Y(t) = \int_0^t y(t) dt = \int_0^t \frac{\theta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\theta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\theta \right] dt. \quad (5)$$

试样在初始条件下无损伤, 即 $t=0$ 时, $Y=0$, 故损伤函数可为

$$Y(t) = \int_0^t y(t) dt = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\theta \right]. \quad (6)$$

许宏发^[22]指出, 岩石的弹性模量具有随时间变化的非定性, 随着时间的增加, 弹性模型呈下降趋势, 其实质为岩石内部结构损伤的结果。由此定义损伤变量:

$$D(t) = 1 - \frac{E_t}{E_c}, \quad (7)$$

式中, E_c 为初始弹性模量, E_t 为 t 时刻的弹性模量。

假设 E_t 由初始弹性模量 E_c 向长期弹性模量 E_∞ 逐渐衰减, 并根据时效损伤函数定义如下损伤演化方程:

$$D_t = \frac{E_c - E_\infty}{E_c} \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\theta \right] \right). \quad (8)$$

当 $D_t = 0$ 时, 岩石处于无损态; $D_t \in (0, 1)$ 时, 岩石处于损伤态; $D_t = 1$ 时, 岩石处于完全损伤态。以各向同性损伤表征各蠕变特征参数的时效损伤演变规律, 则任意时刻 t 的蠕变参数 M 为

$$M_t(N, \omega, t) = M_c(N, \omega) \times (1 - D_t) = M_c(N, \omega) \times \left[\frac{E_c \exp(-(t/\lambda)^\theta) + E_\infty (1 - \exp(-(t/\lambda)^\theta))}{E_c} \right]. \quad (9)$$

4.2 考虑冻融及含水劣化的西原模型

传统的西原模型由 Hooke 体、Kelvin 体与黏塑性体串联而成 (图 6), 其优点在于能较好地反映岩石蠕变变形中的弹黏塑性力学行为。其中, Kelvin 体由 Hooke 体与理想黏性体并联而成, 黏塑性体由理想塑性体与理想黏性体并联而成。以常规西原模型为基础, 引入冻融含水率劣化系数及时效性损伤演化方程, 建立一种考虑冻融及含水劣化的西原模型 (FTWnishihara), 其蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_h(N, w, t)} + \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k(N, w, t)}{\eta_k(N, w, t)} t\right) \right] \frac{\sigma}{E_k(N, w, t)} & (\sigma < \sigma_s) \\ \frac{\sigma}{E_h(N, w, t)} + \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k(N, w, t)}{\eta_k(N, w, t)} t\right) \right] \frac{\sigma}{E_k(N, w, t)} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_p(N, w, t)} t & (\sigma \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\sigma(\varepsilon)$ 为模型的总应力 (应变); $E_h(N, w, t)$ 为 Hooke 体的弹性模量; $E_k(N, w, t)$ 为 Kelvin 体中 Hooke 体的弹性模量, $\eta_k(N, w, t)$ 为 Kelvin 体中理想黏性体所对应的黏性系数; $\eta_p(N, w, t)$ 为黏塑性体中理想黏性体所对应的黏性系数, σ_s 为蠕变屈服强度。

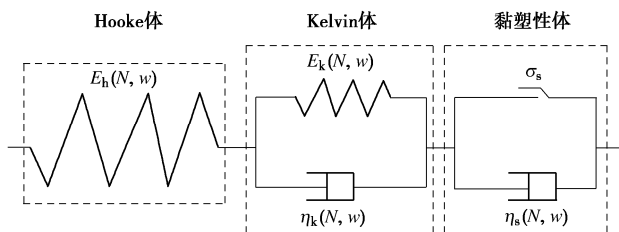


图 6 西原模型

Fig. 6 Nishihara model

式 (10) 为一维蠕变方程, 而本次试验对岩石进行了三轴蠕变试验, 为此, 需引入弹塑性力学理论对上述方程进行三维扩展。在三维应力状态下, 应力张量可分解为球形应力张量与偏斜应力张量; 同理, 物体的变形可分为两个部分, 球形应力张量 (各向相等的正应力) 引起物体体积发生相对变形, 而偏斜应力张量引起物体几何形状发生改变, 前一种变形不包含畸变, 而后一种变形不包括体积变形。对于 Hooke 体, 根据广义 Hooke 定律可知其本构方程:

$$\varepsilon_{ij}^h = \frac{1}{2G_h} s_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \quad (11)$$

式中, ε_{ij}^h 为 Hooke 体的应变; s_{ij} 为偏斜应力张量; σ_m 为球形应力张量; δ_{ij} 为克罗内克函数; G_h 与 K 分别为剪切模量和体积模量。假设岩石体积变化为弹性,

蠕变性质体现在剪切变形方面, 则 Kelvin 体的三维本构方程为

$$\varepsilon_{ij}^k = \frac{1}{2G_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] s_{ij} \quad (12)$$

式中, ε_{ij}^k 为 Kelvin 体的应变, G_k 为黏弹性剪切模量。对于黏塑性体, 根据广义塑性力学可知其三维本构关系为

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_p} \left\langle \psi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (13)$$

式中 ε_{ij}^{vp} 为黏塑性体的应变; F 为岩石屈服函数; F_0 为屈服参考值; g 为塑性势函数; $\langle \rangle$ 为屈服条件判断函数, 即

$$\left\langle \psi \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ \psi \left(\frac{F}{F_0} \right) & (F \geq 0) \end{cases} \quad (14)$$

式中, ψ 为幂函数形式, 一般取幂指数为 1。当 $F \geq 0$ 时, 式 (13) 为

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_p} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (15)$$

本文以 Mohr-Coulomb 屈服准则描述岩石的塑性流动规律, 在主向空间中有剪切及张拉屈服:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (16)$$

$$f_t = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (17)$$

式中 σ_1 与 σ_3 分别为最大主应力与最小主应力; c 为岩石的黏聚力; φ 为岩石的内摩擦角; σ_t 为抗拉强度。势函数 g 可表示为

$$g_s = \sigma_1 - \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad (18)$$

$$g_t = -\sigma_3 \quad (19)$$

式中 ϕ 为剪胀角; g_s 为剪切塑性流动的势函数, 符合不相关联的流动法则; g_t 为张拉塑性流动的势函数, 符合相关联流动法则。定义 ε_a 为时效性损伤应变阈值, 当 $\varepsilon_e = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \geq \varepsilon_a$ 时, 岩石进入损伤态, 各蠕变参数开始衰减。当 $F_0 = 1$ 时, 考虑冻融及含水率劣化的西原模型三维本构方程为

$$\varepsilon_{ij}(t) = \frac{1}{2G_h(N, w)} s_{ij} + \frac{1}{3K(N, w)} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2G_k(N, w)} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k(N, w)}{\eta_k(N, w)} t\right) \right] \quad (F < 0, \varepsilon_e < \varepsilon_a) \quad (20a)$$

$$\frac{1}{2G_h(N, w, t)} s_{ij} + \frac{1}{3K(N, w, t)} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2G_k(N, w, t)} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k(N, w)}{\eta_k(N, w)} t\right) \right] \quad (F < 0, \varepsilon_e \geq \varepsilon_a) \quad (20b)$$

$$\frac{1}{2G_h(N,w,t)}S_{ij}+\frac{1}{3K(N,w,t)}\sigma_m\delta_{ij}+\frac{S_{ij}}{2G_k(N,w,t)}\cdot$$
$$\left[1-\exp\left(-\frac{G_k(N,w)}{\eta_k(N,w)}t\right)\right]+\frac{\langle F\rangle}{\eta_p(N,w,t)}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{ij}}t\quad(F\geq 0,\varepsilon_e\geq\varepsilon_a).$$

(20c)

4.3 模型参数辨识及回归分析

依据冻融后不同含水率红砂岩三轴蠕变试验数据, 采用 1stOpt v8.0 数学分析软件以通用全局优化(Universal Global Optimization)算法对考虑冻融及含水劣化的西原模型进行参数辨识, 识别结果见表 2、3。表中分别列出了非屈服应力(限于篇幅, 仅显示偏应力为 40.8MPa)及屈服应力(含加速蠕变)条件下模型辨识参数。

表 2 非屈服应力条件下 (40.8 MPa) 模型辨识参数

Table 2 Parameters identified by universal global algorithm under non-yield stress (40.8 MPa)

冻融循环 次数/N	含水率 /%	G_h /GPa	K /GPa	G_k /GPa	η_k /(GPa·h ⁻¹)
0	0	43.36	37.16	13.42	2.41
	1	37.91	32.50	10.17	2.13
	2	36.63	31.39	9.09	1.86
	3	22.46	19.25	8.34	1.70
	4.63	18.98	16.27	7.28	1.30
30	0	13.67	11.72	6.63	1.21
	1	11.42	9.79	5.62	1.17
	2	8.31	7.13	5.11	1.04
	3	6.87	5.89	4.85	1.02
	4.63	6.43	5.51	4.52	0.83
60	0	8.10	6.94	5.42	0.98
	1	5.61	4.80	3.90	0.80
	2	4.32	3.70	3.30	0.65
	3	4.08	3.50	2.91	0.60
	4.63	3.99	3.42	2.74	0.43

表 3 屈服应力条件下模型辨识参数

Table 3 Parameters identified by universal global optimization algorithm under yield stress

G_h /GPa	K /GPa	G_k /GPa	η_k /(GPa·h ⁻¹)	η_p /(GPa·h ⁻¹)	θ	λ
4.73	4.65	13.31	3.46	4588.61	39.19	5.01
3.09	3.03	3.88	0.78	1429.21	108.35	9.45

注: 冻融循环 30 次, 含水率为 2%, 屈服应力为 102.0 MPa;
冻融循环 60 次, 含水率为 3%, 屈服应力为 61.2 MPa。

当 $F < 0$ 且 $\varepsilon_e < \varepsilon_a$ 时, 西原模型退化为广义 Kelvin 模型, 需辨识参数包含剪切模量 G_h 、体积模量 K 、黏弹性剪切模量 G_k 及黏性系数 η_k 。由表 2 可知, 在相同含水率条件下, 所有参数均随冻融循环次数的增加而减小, 反映出冻融循环对于岩石时效力学性能的弱化作用; 同样, 当冻融循环次数一定时, 弹性、黏弹性及黏性参数具有随含水率上升而普遍下降的趋势, 体现出水对于试样的劣化作用。因此, 试样的含水率越高且经历冻融循环次数越多, 其时效变形特征量化反映为模型黏弹性参数值越低。当 $F \geq 0$ 且 $\varepsilon_e \geq \varepsilon_a$ 时,

西原模型为塑性屈服及时效损伤态, 表 3 中的蠕变参数为其进行时效衰减时的初始值。由于在上述试验中, 仅含水率 2% (冻融 30 次) 与 3% (冻融 60 次) 的试样经历了加速蠕变 (其余工况试样均在加载过程破坏), 因此仅使用该类试样的数据进行模型参数辨识。由表 3 可知, 当冻融循环次数及含水率较高时, 黏弹性力学参数呈下降趋势, 而时效损伤特征参数显著上升。

将识别的模型参数代入式 (2), (3), 计算得到黏弹性冻融含水劣化系数, 并建立劣化系数的回归曲线, 如图 7 所示。其中, 图 7 (a) 为基于参数 G_k 建立的弹性冻融含水劣化系数曲线, 而图 7 (b) 为基于参数 η_k 建立的黏性冻融含水劣化系数曲线。从图中数据可知, 劣化系数与含水率及冻融循环次数呈负相关。从回归曲线可见, 弹性劣化系数与含水率呈非线性负指数相关, 黏性劣化系数与含水率呈线性相关, 但在相同冻融循环次数下, 随着含水率的增加, 弹性及黏性劣化系数曲线的整体下降幅度一致, 故其区别仅在于曲线的下降变化过程。

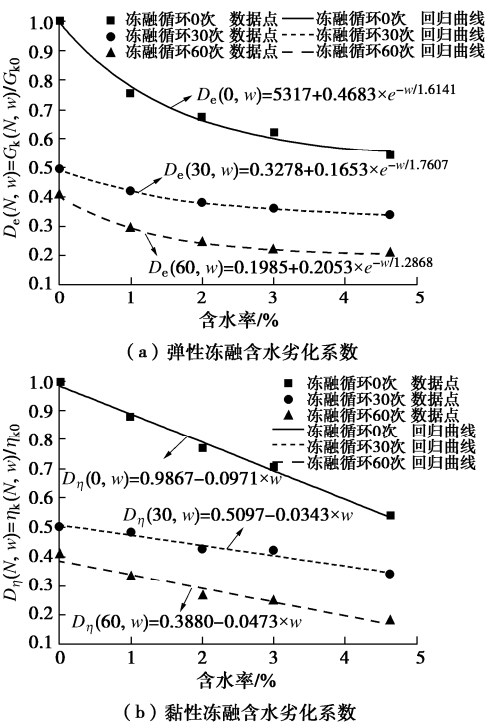


图 7 黏弹性冻融含水劣化系数回归曲线

Fig. 7 Regression curves of viscoelastic freeze-thaw deterioration coefficient considering water content

4.4 模型二次开发及三维计算效果

本文通过 FLAC^{3D} 进行二次开发, 为方便 FTWnishihara 模型程序化, 下面推导本构方程的三维中心差分形式。模型的偏量关系有

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^h + \dot{e}_{ij}^k + \dot{e}_{ij}^{vp} \quad (\text{总偏应变率}), \quad (21)$$

$$\dot{S}_{ij} = 2G_h \dot{e}_{ij}^h \quad (\text{Hooke 体}), \quad (22)$$

$$S_{ij} = 2G_k e_{ij}^k + 2\eta_k \dot{e}_{ij}^k \quad (\text{Kelvin 体}), \quad (23)$$

$$\dot{e}_{ij}^{vp} = \frac{\langle F \rangle}{\eta_p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{1}{3} \dot{e}_{vol}^{vp} \delta_{ij} \quad (\text{黏塑性体}). \quad (24)$$

式 (21) 的增量形式为

$$\Delta e_{ij} = \Delta e_{ij}^h + \Delta e_{ij}^k + \Delta e_{ij}^{vp}. \quad (25)$$

采用中心差分形式, 式 (22) 为

$$\Delta S_{ij} = 2G_h \Delta e_{ij}^h. \quad (26)$$

式 (23) 为

$$\overline{S_{ij}} \Delta t = 2G_k \overline{e_{ij}^k} \Delta t + 2\eta_k \Delta e_{ij}^k, \quad (27)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{S_{ij}^O + S_{ij}^N}{2}, \quad (28)$$

$$\overline{e_{ij}^k} = \frac{e_{ij}^O + e_{ij}^N}{2}. \quad (29)$$

式中 S_{ij}^O 与 S_{ij}^N 分别为一个时间步内旧的偏应力及新的偏应力; e_{ij}^O 与 e_{ij}^N 分别为一个时间步内旧的应变偏量及新的应变偏量。将式 (28), (29) 代入式 (27) 可得到 Kelvin 体的应变偏量:

$$e_{ij}^{k,N} = \frac{1}{A} \left[B e_{ij}^{k,O} + \frac{\Delta t}{4\eta_k} (S_{ij}^O + S_{ij}^N) \right], \quad (30)$$

$$A = 1 + \frac{G_k \Delta t}{2\eta_k} \quad B = 1 - \frac{G_k \Delta t}{2\eta_k}. \quad (31)$$

将式 (26), (30) 代入式 (25), 得到更新后的偏应力:

$$S_{ij}^N = \frac{1}{a} \left[\Delta e_{ij} - \Delta e_{ij}^{vp} + b S_{ij}^O - \left(\frac{B}{A} - 1 \right) e_{ij}^{k,O} \right], \quad (32)$$

$$a = \frac{1}{2G_h} + \frac{\Delta t}{4A\eta_k} \quad b = \frac{1}{2G_h} - \frac{\Delta t}{4A\eta_k}. \quad (33)$$

因球应力不产生塑性变形, 故整个模型的球应力为

$$\sigma_0^N = \sigma_0^O + K(\Delta \varepsilon_{vol} - \Delta \varepsilon_{vol}^{vp}). \quad (34)$$

综上所述, 式 (32), (34) 为编译程序时运用的 FTWnishihara 模型应力应变关系形式。此外, 关于 ε_e 是否超过了应变阈值, 以及岩石是否发生时效性损伤, 即各蠕变参数以式 (9) 的形式进行衰减均可通过 FLAC^{3D} 内置 FISH 语言进行编写实现。

根据 FTWnishihara 本构方程的中心差分形式及 FLAC^{3D} 提供的自定义本构模型接口, 借助 VC 开发环境编译生成 FTWnishihara.dll 文件, 并加载到 FLAC^{3D} 之中。以冻融 30 次含水率 2% 的红砂岩及冻融 60 次含水率 3% 的红砂岩三轴蠕变试验作为数值算例, 采用 FTWnishihara 模型对红砂岩蠕变试验进行数值验证, 同时将 FLAC^{3D} 内置 Burgers 模型作为模拟效果对比。模拟试件与前述试验所采用的岩样尺寸一致, 试

件共划分 660 个单元体, 876 个节点; 强度参数通过常规三轴试验获取, 蠕变参数以 UGO 算法识别的参数 (表 3) 为基准; 在边界条件的设定中, 与真实试验一致固定住模型底端。荷载设定环向均匀应力 5 MPa 为围压, 顶部施加均匀轴向荷载, 计算过程中记录轴向位移云图及位移时间曲线。

图 8 为模型曲线与试验数据对比, 同时也将时效损伤曲线绘制其中。可见, Burgers 模型曲线与试验数据具有一定偏差, 且模型无法反映岩石非线性加速蠕变特征。本文构建的 FTWnishihara 模型曲线与试验曲线吻合较好, 且模型能较为完整地描述冻融后不同含水率红砂岩在衰减、稳态及加速蠕变阶段的变形特征。从损伤曲线可知, 红砂岩在衰减及稳态蠕变阶段的损伤发展较为平稳, 进入加速蠕变后损伤量 D_t 开始急剧增长, 在加速蠕变后期岩石呈完全损伤态。

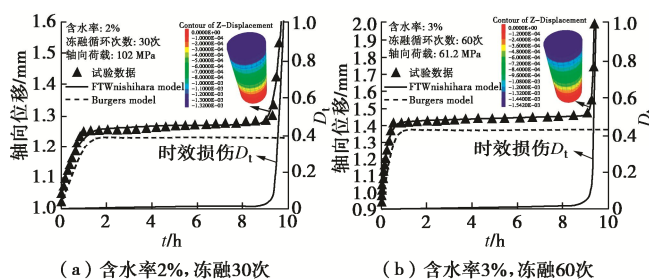


图 8 理论计算及模拟监测曲线与试验数据对比

Fig. 8 Comparison among theoretical calculation, numerical simulation curve and experimental data

5 结 论

(1) 冻融循环作用促进了红砂岩内孔隙的发育扩展, 其中试样以中小孔的快速发育为主; 含水率越高, 冻融后试样内孔隙的发育程度越大, 各尺寸孔隙的发育程度为中孔 > 小孔 > 大孔。

(2) 冻融循环次数及含水率与红砂岩在相同偏应力下的蠕变量、蠕变速率及蠕变时长呈正相关, 与屈服应力及长期强度呈负相关。随着含水率的增加, 冻融后试样断面由剪切向张拉劈裂型逐渐演变。

(3) 依据岩石在含水率控制下的冻融损伤及时效性损伤效应, 构建 FTWnishihara 模型。结合试验对模型进行参数识别, 得出黏弹性参数及冻融含水劣化系数与冻融循环次数及含水率呈负相关。通过 FLAC^{3D} 蠕变试验模拟, 验证模型能较好地描述冻融后不同含水率红砂岩在各蠕变阶段的变形特征。

参考文献:

- [1] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020,

- 39(3): 445 - 468. (XUE Yi-guo, KONG Fan-meng, YANG Wei-min, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445 - 468. (in Chinese))
- [2] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1318 - 1336. (CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, YU Hong-dan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of low temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1318 - 1336. (in Chinese))
- [3] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 555 - 565.
- [4] KHANLARI G, ABDILOR Y. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of upper red sandstones in central Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1287 - 1300.
- [5] 贾海梁, 项 伟, 谭 龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879 - 895. (JIA Hai-liang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879 - 895. (in Chinese))
- [6] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平, 等. 冻融循环下钙质砂岩力学特性及其损伤劣化机制的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1802 - 1812. (HAN Tie-lin, CHEN Yun-sheng, SHI Jun-ping, et al. Experimental study on mechanical properties and damage degradation mechanism of calcareous sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1802 - 1812. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 王 俐. 不同初始含水率红砂岩冻融损伤的试验研究及其机理分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. (WANG Li. Experimental Studies and Mechanism Analysis on Different Initial Water-Saturated Red Sandstones Under Condition of Frost and Thaw[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [9] 刘海康, 张思渊, 张鑫鑫. 不同初始含水率下砂岩冻融劣化特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 322 - 327. (LIU Hai-kang, ZHANG Si-yuan, ZHANG Xin-xin. Experimental study of freeze-thaw deterioration specialty of sandstone in different initial moisture content[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 322 - 327. (in Chinese))
- [10] 贺晶晶, 师俊平. 冻融后不同含水状态砂岩的剪切破坏特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1350 - 1358. (HE Jing-jing, SHI Jun-ping. Shear failure properties of sandstone with different moisture contents after cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1350 - 1358. (in Chinese))
- [11] 王 鹏, 许金余, 方新宇, 等. 红砂岩吸水软化及冻融循环力学特性劣化[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2065 - 2072. (WANG Peng, XU Jin-yu, FANG Xin-yu, et al. Water softening and freeze-thaw cycling induced decay of red-sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2065 - 2072. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 童庆闯. 冻融循环作用下炭质页岩蠕变损伤特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017. (TONG Qing-chuang. Study on Creep Damage Characteristics of Carbonaceous Shale under Freezing and Thawing[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 张峰瑞, 姜谟男, 杨秀荣, 等. 冻融循环下花岗岩剪切蠕变试验与模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 509 - 519. (ZHANG Feng-rui, JIANG An-nan, YANG Xiu-rong, et al. Experimental and model research on shear creep of granite

- under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 509 - 519. (in Chinese))
- [16] 杨圣奇, 徐卫亚, 杨松林. 龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 895 - 902. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, YANG Song-lin. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan Hydropower Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 895 - 902. (in Chinese))
- [17] 王来贵, 赵娜, 何峰, 等. 岩石蠕变损伤模型及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 64 - 68. (WANG Lai-gui, ZHAO Na, HE Feng, et al. Rock creep damage model and its stability analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 64 - 68. (in Chinese))
- [18] 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 Sheng-qi, XU Peng. A new nonlinear rheological damage model for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1846 - 1854. (in Chinese))
- [19] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1297 - 1308. (ZHAO Yan-lin, TANG Jin-zhou, FU Cheng-cheng, et al. Rheological test of separation between viscoelastic-plastic strains and creep damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1297 - 1308. (in Chinese))
- [20] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1775 - 1782. (SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, RONG Teng-long, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1775 - 1782. (in Chinese))
- [21] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 183 - 191. (WU Dong-sheng, MENG Lu-bo, LI Tian-bin, et al. Study of triaxial rheological property and long-term strength of limestone after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 183 - 191. (in Chinese))
- [22] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246 - 251. (XU Hong-fa. Time-dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 1997, 16(3): 246 - 251. (in Chinese))

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)

2021年度开放课题申请指南

重点实验室自2007年2月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来,按照教育部重点实验室的开放要求,自2008年起面向国内外公开征集开放基金项目,连续十年批准了70余项国内外访问学者的申请,取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究,本年度继续设立专项开放研究基金,资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

1. 资助范围

开放课题应紧密围绕本重点实验室的主要研究方向,资助意义重大、具有重要科学意义和应用前景的研究项目。本年度开放课题主要资助的研究方向如下:①软土力学理论与变形稳定控制;②宏微观土力学理论与环境土工灾变;③岩土体多场耦合理论与灾害控制;④软弱岩土体地质灾害与防治加固;⑤地下工程安全理论与风险控制;⑥城市地下空间与岩体地下工程。

2. 申请资格

同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

3. 资助金额

申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额,开放基金的资助强度一般每项不超过3万元,总计拟资助6项。

4. 项目执行期限

每个项目实施期限为两年,即2021年10月1日至2023年9月30日。

5. 申报程序

(1) 开放基金申请人应认真阅读有关申请说明,申报课题必须符合本实验室的研究方向,属于2021年资助研究内容的范畴,并具有本重点实验室固定研究人员合作。同济大学有关研究人员的介绍,可查阅: <http://geotec.tongji.edu.cn/keylab/yjry>。

(2) 本年度开放课题申请截止时间为2021年8月31日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式2份寄给:上海市杨浦区四平路1239号同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室(邮政编码200092),刘琦老师收(电话:021-65985200,13917983456, E-mail: liuqi472@tongji.edu.cn)。除纸质申请材料,申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF格式),并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。

(3) 最终结果将于2021年9月公布。

(岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 供稿)