

DOI: 10.11779/CJGE202104008

# 不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变特性

陈国庆<sup>1</sup>, 简大华<sup>1</sup>, 陈宇航<sup>1</sup>, 万 亿<sup>1</sup>, 林之恒<sup>2</sup>

(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:** 针对高海拔地区岩体在冻融作用及含水状态下的劣化特征及长期稳定性, 对不同含水率红砂岩进行了冻融后核磁共振检测及剪切蠕变试验, 揭示了冻融循环及含水率变化对红砂岩细观结构及蠕变特性的影响机制, 据此构建合理的剪切蠕变模型。研究表明: 在冻融作用下, 饱水红砂岩呈现出由小尺寸孔隙增长向中小尺寸孔隙共同增长的趋势, 而饱和红砂岩主要以中、大孔隙增长为主。在长期荷载作用下, 随着含水率的增加, 冻融后红砂岩的蠕变量普遍增大, 而长期强度及长期折减系数显著降低, 破坏前试样更易出现加速蠕变特征, 破坏后试样宏观形态更为碎裂。根据红砂岩的冻融损伤及时效性损伤效应, 建立了红砂岩冻融剪切蠕变模型, 并对模型进行了参数优化辨识, 借此验证了模型的正确性及合理性。研究结果对于冻融岩质灾害的防控和评价具有参考价值。

**关键词:** 剪切蠕变; 含水率; 冻融; 红砂岩; 本构模型

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)04-0661-09

**作者简介:** 陈国庆(1982—), 男, 教授, 主要从事岩石力学、地质灾害防治研究工作。E-mail: chgq1982@126.com。

## Shear creep characteristics of red sandstone after freeze-thaw with different water contents

CHEN Guo-qing<sup>1</sup>, JIAN Da-hua<sup>1</sup>, CHEN Yu-hang<sup>1</sup>, WAN Yi<sup>1</sup>, LIN Zhi-heng<sup>2</sup>

(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:** According to the deterioration characteristics and long-term stability of rock mass in high altitude under the action of freeze-thaw and in water-saturated state, the nuclear magnetic resonance (NMR) technique is used to test the red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents, and the shear creep experiments are conducted. Based on the experimental phenomena, the effects of freeze-thaw cycles and water content on the microstructure and creep characteristics of red sandstone are analyzed, and a reasonable creep model is proposed. The results show that the microstructure of wet red sandstone evolves from the main increase of small-size pore to the mutual increase of small-size pore and mesopore with the increasing freeze-thaw cycles, while the mesopore and macropore propagate mainly inside the saturated red sandstone. With the increase of water content, the creep strain of red sandstone generally increases, while the long-term strength and long-term reduction coefficient decrease significantly, the accelerated creep characteristics of red sandstone appear more easily before rock failure, and the macroscopic modes become more fragmented after rock failure. Considering the effects of freeze-thaw damage and time-dependent damage, a new shear creep model for red sandstone subjected to freeze-thaw cycles is established. The parameters of the model are identified by applying the 1stOpt mathematical analysis software, and the correctness and rationality of the model are verified. The research results have reference value for the prevention and evaluation of rock disasters in cold regions.

**Key words:** shear creep; water content; freeze-thaw; red sandstone; constitutive model

## 0 引 言

高寒山区冰川、溪流和江河等地表径流发育, 表层含水岩体经受冻融作用后, 水冰相变产生冻胀力直接导致岩体内部裂隙扩展, 岩体不断劣化。在长期自身重力荷载作用下蠕变特性非常显著, 一旦达到长期抗剪强度, 极易诱发失稳破坏。因此, 对在不同含水

条件下的冻融岩石剪切蠕变特性进行深入研究, 对于寒区岩体工程建设具有重要意义。

目前, 国内外学者在岩石蠕变方面的研究做出了

**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 (KYY2019066(19-20))

**收稿日期:** 2020-06-17

大量的探索,并获得了丰硕的研究成果。相关学者对不同含水率岩石的蠕变行为进行了研究,提出新的流变模型并验证模型的正确性<sup>[1-5]</sup>。岩石的蠕变特性受温度影响,高温下岩石的蠕变时长变短,抗变形能力下降<sup>[6]</sup>。Hou等<sup>[7]</sup>在不同初始损伤水平砂岩多次加载蠕变试验的基础上,提出一套统一的蠕变参数来预测砂岩在不同初始损伤状态下的蠕变行为。法向荷载对岩石剪切蠕变特性有一定影响,在剪切荷载恒定条件下,岩石蠕变变形随着法向荷载的增大而减小<sup>[8-10]</sup>。杨圣奇等<sup>[11-12]</sup>通过传统模型基础上加以改进,推导出一种非线性流变损伤模型。赵延林等<sup>[13]</sup>提出岩石黏弹塑应变分离的蠕变试验方法和数据处理技巧。相关学者对结构面剪切蠕变特性进行了研究,并建立能够合理描述结构面剪切蠕变特性的本构模型<sup>[14]</sup>。冻融作用对岩石蠕变行为具有显著影响,随着冻融循环次数增加,岩石破坏应力、蠕变时长及长期强度均有明显降低趋势<sup>[15]</sup>。

上述关于岩石蠕变的研究多数以岩石处于常温或冻融饱和状态为前提,而对于探讨岩石在不同冻融及含水状态下的剪切蠕变特性尚不多见。因此,本文通过对不同含水率红砂岩进行了冻融后核磁共振检测及剪切蠕变试验,分析了冻融作用下不同含水率红砂岩的孔隙结构演变特征及剪切蠕变特性,并考虑冻融与时效损伤效应,构建可描述冻融红砂岩剪切蠕变特性的本构模型。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验设备

试样选用于川藏线冻融区的红砂岩试样,严格按照《水利水电岩石试验规程》(SL264—2001)的试验要求,将岩样尺寸加工为50 mm×50 mm×50 mm的正方体试件,然后对加工完成的所有试件进行波速检测,剔除均质性较差试件。对筛选好的红砂岩试样进行试验,试验过程用到的仪器设备主要有:真空抽气饱和装置、全自动烘箱、全自动冻融测试仪、核磁共振分析系统以及岩石直剪流变仪。

### 1.2 试验步骤

首先,将试样放入烘箱中在108℃条件下烘24 h,得到干燥试样及试样的干重,再进行真空抽气饱和处理,得到饱和试样及试样的饱和含水率(3.78%)。其次,将饱和试样分2组放入烘箱中,每隔1 h对试样进行称重,直至获得饱水组试样(含水率为1.5%与2.4%)。因此,本次试样在红砂岩为干燥(0%)、饱水(1.5%与2.4%)及饱和(3.78%)的条件下进行。最后,将试样放入全自动冻融测试箱中进行冻融循环,根据川藏线岩石采样区域的年温度幅值设定冻融温差

为-20℃~40℃,冻融时长以文献[16]参考,设定冻结时间为1小时,融化时间为1 h,即每2 h为一次循环,冻融次数分别为0,30,60,90及120次。通过以上步骤获得了不同含水率冻融后红砂岩试样。

为分析不同含水率红砂岩在冻融后的细观结构演变特征,通过核磁共振技术对红砂岩进行横向弛豫时间( $T_2$ )与孔隙度测试。试验采用MacroMR12-150H-I核磁共振分析系统(如图1所示),该仪器通过CPMG脉冲序列进行横向弛豫时间测试,仪器试验采用的共振频率为12.803 MHz,主磁场强度为0.3±0.05T,磁体温度范围控制在32.00±0.01℃之间。

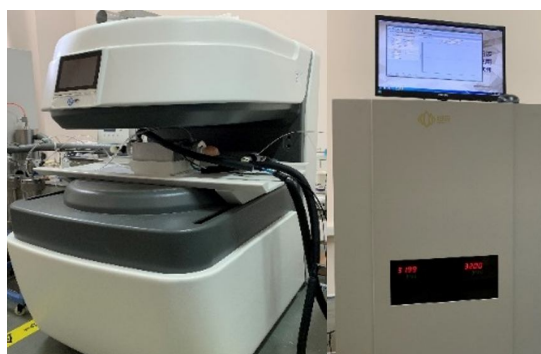


图1 MacroMR12-150H-I核磁共振分析系统

Fig. 1 MacroMR12-150H-I NMR system

将不同含水率冻融后的红砂岩放入YZJL-300岩石直剪流变仪(如图2所示)中进行剪切蠕变试验,试验采用分级加载法,设定初始正应力为6 MPa,保持正应力不变,逐级施加剪切应力 $\Delta\tau$ 为6 MPa,每一级剪应力维持2 d,按此加载至试样完全破坏。试验过程中连续记录应力、位移与时间数据。



图2 YZJL-300岩石直剪流变仪

Fig. 2 YZJL-300 rock direct shear creep apparatus

## 2 核磁共振测试结果分析

### 2.1 $T_2$ 谱分布特征

试样内部孔径的大小与横向弛豫时间( $T_2$ )的长短有关, $T_2$ 越长,对应的孔径越大;孔隙数量则与 $T_2$ 谱总面积有关, $T_2$ 谱总面积越大,对应的孔隙数量越多。

图 3 给出了不同含水率红砂岩冻融后  $T_2$  测试结果。可以看出, 红砂岩  $T_2$  谱曲线主要呈现出 3 个峰值, 而峰下面积分布主要集中在横向弛豫时间  $0.1 \sim 10$  ms 之间, 反映出红砂岩试样内部主要发育有 3 种尺寸范围的孔隙结构, 而小尺寸孔隙分布最为广泛。由图 3 (a), (b) 可知, 随着冻融循环次数的增加, 饱水试样的第一个谱峰和第二个谱峰都会随之增大。在任何冻融循环次数下, 饱水试样的第三谱峰均变化较小。由此可知, 冻融循环作用促进了饱水试样小尺寸孔隙的发育, 而含水率的增加有助于小尺寸孔隙扩展为相对更大的中尺寸孔隙。由图 3 (c) 可以看出, 在  $30 \sim 90$  次冻融循环过程中, 饱和试样 3 个谱峰随冻融循环次数的增加产生了不同幅度的增长; 在  $90 \sim 120$  次冻融循环后, 第二与第三谱峰产生大幅度增长。表明红砂岩试样在饱和状态下, 冻融 90 次前主要以小、中尺寸孔隙增长为主, 而冻融 90 次后, 部分小尺寸孔隙逐渐扩展成为中大尺寸孔隙, 主要呈现以中大尺寸孔隙增长为主趋势。

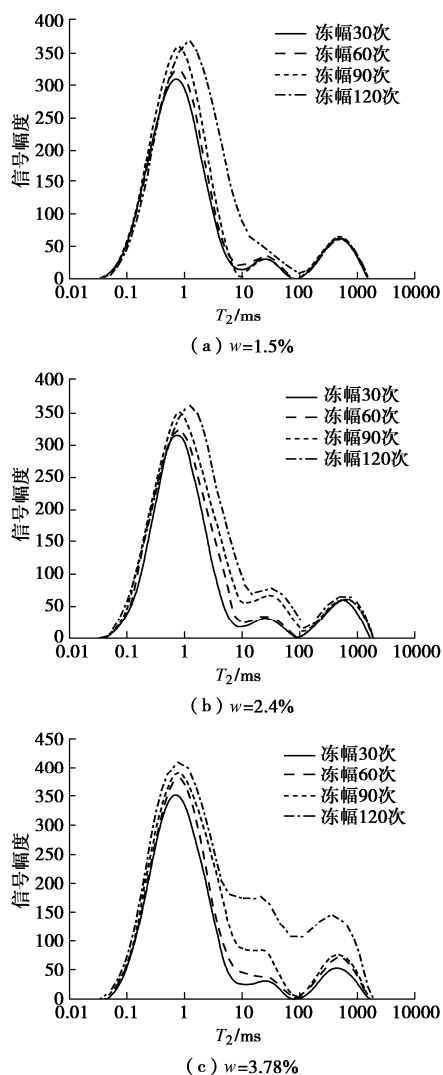


图 3  $T_2$  谱分布变化曲线

Fig. 3  $T_2$  distribution of red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents

综上所述, 饱水红砂岩呈现出由小尺寸孔隙增长向中小尺寸孔隙共同增长的趋势, 而饱和红砂岩主要以中、大孔隙增长为主。

表 1 给出了不同含水率冻融后试样  $T_2$  谱总面积及孔隙率的变化情况, 可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 3 种含水率下试样的  $T_2$  谱总面积与谱面积变化率均有所增长, 但增长幅度不一, 含水率为 1.5%, 2.4% 及饱和试样在经历 30 到 120 次冻融循环后, 谱面积变化率分别增加了 38.10%, 55.25% 和 85.48%。含水率越高, 冻融后红砂岩试样的孔隙率越大, 表明水分的增加加速了红砂岩内部孔隙的扩展, 增强了试样对冻融作用的敏感性。

表 1 NMR 试样  $T_2$  谱总面积及孔隙率变化

Table 1 Total areas of  $T_2$  distribution and NMR porosities of red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents

含水率 /%	冻融循环次数 $N$ /次	$T_2$ 谱总面积	谱面积变化率 /%	孔隙率 /%
1.5	30	13014	0	10.28
	60	13711	5.36	10.83
	90	14915	14.61	11.78
	120	17972	38.10	14.19
2.4	30	13189	0	10.92
	60	13965	5.88	11.87
	90	16372	24.13	13.53
	120	20476	55.25	16.14
3.78	30	14885	0	11.75
	60	16885	13.44	13.33
	90	19974	34.19	15.77
	120	27608	85.48	21.80

2.2 基于 NMR 的冻融损伤因子

对于冻融岩石的损伤破坏可认为是一个连续性不断降低的过程<sup>[17]</sup>, Kachanov 通过引入无量纲变量—连续性因子  $\psi$  来表征材料损伤劣化的渐变过程, 当  $\psi = 1$  时, 表示材料处于无损状态; 当  $0 < \psi < 1$  时, 表示材料处于受损状态; 当  $\psi = 0$  时, 表示材料处于完全破坏状态。Rabotnov 提出了连续性因子的相补参量—损伤度  $\omega$ ,  $\omega = 1 - \psi$ 。通过核磁共振技术可以获取岩样的孔隙率, 假设试验前岩样具有初始损伤, 其初始损伤度可以用初始孔隙率来描述, 并且冻融前后岩样尺寸大小未变, 即体积保持不变。

基于上述假设, 以未冻融的岩样作为初始状态, 冻融作用后的岩样作为损伤状态。冻融作用后孔隙率的增加使得岩样的损伤度增加、连续性降低, 可认为是岩样固体颗粒体积减小的原因, 则获得连续性因子  $\psi$  的表达式为

$$\psi = V_s / V \quad , \quad (1)$$

式中,  $V$  为岩样体积,  $V_s$  为岩样固体颗粒体积, 二者之间的关系表示为

$$V_s = V(1 - \phi) \quad , \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为岩样的孔隙率。

根据应变等价原理, 受损岩石的应力-应变关系可用虚拟的无损状态下的应力-应变关系代替, 只需把其真实应力替换成有效应力。受损岩石在外荷载作用下的有效应力为  $\bar{\sigma} = \sigma / \psi$ , 其中  $\psi = 1 - \varphi$ ,  $\sigma$  为材料的真实应力, 可以得到红砂岩 NMR 孔隙率与有效应力表达式:

$$\bar{\sigma} = \sigma / (1 - \varphi) \quad (3)$$

根据式 (3), 基于红砂岩核磁共振孔隙率检测结果可得出有效应力与孔隙率的关系。

根据表 1 给出的 3 种含水率 (1.5%, 2.4% 和 3.78%) 下试样的核磁共振孔隙率, 分别拟合出试样冻融循环 30, 60, 90 和 120 次后核磁共振孔隙率  $\varphi$  与冻融循环次数  $N$  之间的关系 (如图 4), 拟合表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} 1.5\%: \varphi &= 5.16667 \times 10^{-6} N^2 - 3.523 \times 10^{-4} N + 0.10925, \\ 2.4\%: \varphi &= 8.13889 \times 10^{-6} N^2 - 5.165 \times 10^{-4} N + 0.11812, \\ 3.78\%: \varphi &= 12.425 \times 10^{-6} N^2 - 7.678 \times 10^{-4} N + 0.13077. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据式 (4) 可得出 3 种含水率下试样有效应力随冻融循环次数变化的关系式为

$$\left. \begin{aligned} 1.5\%: \bar{\sigma} &= \sigma / -5.16667 \times 10^{-6} N^2 + 3.523 \times 10^{-4} N + 0.89075, \\ 2.4\%: \bar{\sigma} &= \sigma / -8.13889 \times 10^{-6} N^2 + 5.165 \times 10^{-4} N + 0.88188, \\ 3.78\%: \bar{\sigma} &= \sigma / -12.425 \times 10^{-6} N^2 + 7.678 \times 10^{-4} N + 0.86922. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由图 4 可知, 不同含水率下红砂岩试样的核磁共振孔隙率与冻融循环次数具有良好的正相关性, 随着含水率的增大, 孔隙率增大明显, 反映出红砂岩试样在冻融作用下的敏感性随着含水率的增大变得更加强烈。基于损伤力学理论引入连续性因子, 推导获得的不同冻融循环条件下有效应力与冻融循环次数的关系表达式具有理论依据。

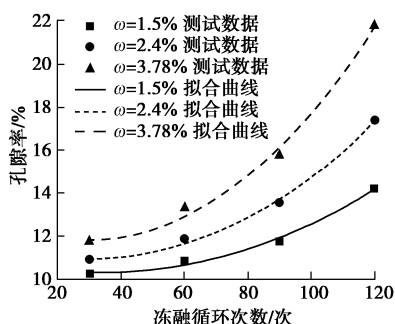


图 4 冻融后红砂岩孔隙率与冻融循环次数拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves between porosity and freeze-thaw cycles of red sandstone samples

### 3 剪切蠕变试验结果分析

#### 3.1 剪切蠕变特征

图 5 给出了冻融后红砂岩在干燥 ( $w=0\%$ )、饱水

( $w=1.5\%$ ) 及饱和 ( $w=3.78\%$ ) 状态下的剪切蠕变曲线, 由图可知, 同一含水率下, 随着冻融循环次数的增加, 试样能承受的剪切荷载等级逐渐降低。同样地, 当冻融循环次数相同时, 随着含水率的增加, 试样所能承受的剪应力等级逐渐降低, 而蠕变位移显著增加, 表明红砂岩剪切蠕变特性不仅与冻融次数有关, 且与含水率密切相关。

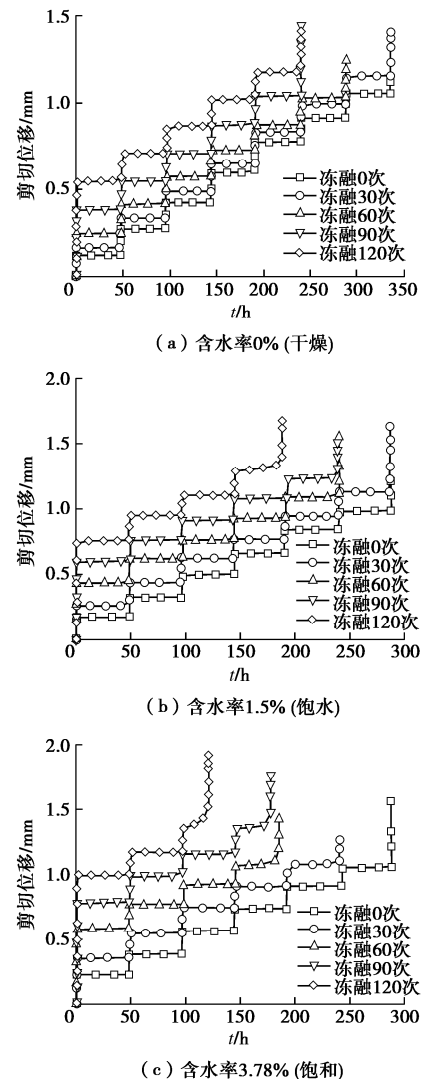


图 5 不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变曲线

Fig. 5 Shear creep curves of red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles under different water contents

利用 Boltzmann 叠加原理对分级加载蠕变试验数据处理绘制出分别加载剪切蠕变曲线, 如图 6 所示。限于篇幅, 只列出不同含水率红砂岩冻融 120 次后的蠕变曲线。由图可知, 3 种试样的蠕变位移在施加剪切荷载后很快就趋于平稳, 稳定蠕变为整个蠕变过程中的主要部分。

冻融后干燥试样在长期剪切荷载作用下仅表现出衰减和稳定蠕变特征, 且试样破坏发生在最后一级剪切荷载施加过程中, 表现为极短时间内位移突增。含

水率为 1.5% 与 3.78% 的试样除了表现出衰减和稳定蠕变特征外, 在破坏应力下还出现了明显的加速蠕变特性, 且在破坏应力下试样蠕变时长随着含水率的增加逐渐变短。

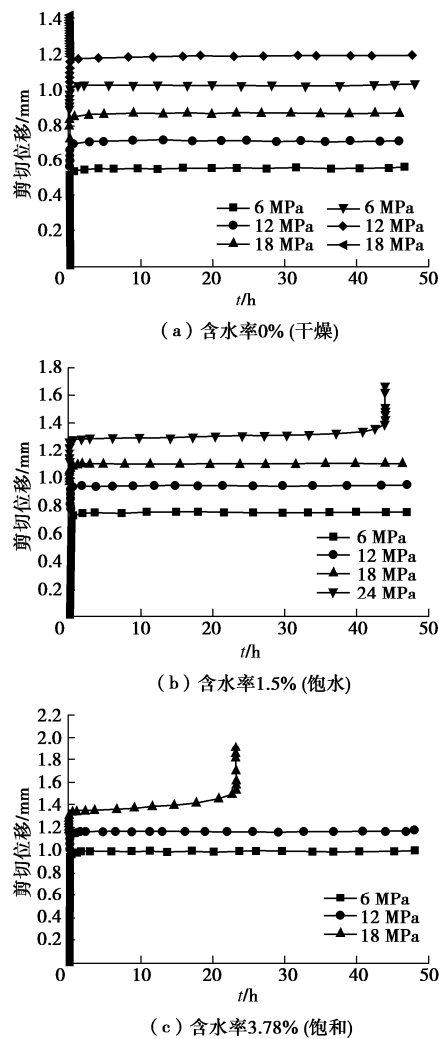


图 6 不同含水率冻融后红砂岩分别加载剪切蠕变曲线  
Fig. 6 Separated by loaded shear creep curves of red sandstone samples subjected to 120 freeze-thaw cycles under different water contents

以上现象分析原因如下, 干燥红砂岩冻融后受损较轻, 矿物颗粒之间胶结较为紧密, 稳态蠕变过程中, 颗粒间的能量积累到一定程度时, 瞬间就会发生整体剪切破坏, 呈现出典型的脆性破坏形式。而饱水及饱和红砂岩在冻融循环过程中, 由于水的附存促使冻胀力的产生, 削弱了矿物颗粒间的黏聚力, 加上融化后水对矿物颗粒的润滑与软化作用, 促进了颗粒间的滑移, 当稳态蠕变量达到一定阈值时, 进入加速蠕变阶段。

3.2 长期强度特征

根据稳定蠕变速率法<sup>[18-19]</sup>, 确定不同含水率冻融后红砂岩的长期强度, 并进一步计算红砂岩的长期折减系数, 如表 2 及与图 7 所示。可以发现, 红砂岩长

期强度与冻融循环次数及含水率呈负相关; 随着含水率的增加, 红砂岩的长期折减系数有所减小, 验证了岩石内水作为冻融损伤的驱动因素深刻地影响了冻融红砂岩抵御长期荷载的能力。

对于含水率 0% 的试样, 其长期折减系数在冻融 0~120 次之间变化不大, 这是由于反复冻融作用不足以对岩石骨架造成太大的损伤, 而当试样内部充满足够多的水分时, 水冰相变除了可以通过膨胀作用直接导致岩石内部孔隙扩展外, 还通过挤压微小孔隙导致岩石骨架的破坏。因此, 含水率 3.78% 的试样在冻融 0~120 之间长期折减系数呈持续下降趋势。

表 2 不同含水率冻融后红砂岩长期剪切强度及长期折减系数

Table 2 Long-term shear strengths and reduction coefficients of red sandstone samples determined by steady creep rate method				
含水率/%	冻融次数 <i>N</i> /次	剪切蠕变长期强度 $\tau_{\infty}$ /MPa	剪切蠕变破坏强度 $\tau_f$ /MPa	长期折减系数 ( $\tau_{\infty}/\tau_f$ )
0	0	41.74	45	0.928
	30	41.51	44	0.943
	60	33.91	38	0.892
	90	29.40	33	0.891
	120	28.43	32	0.888
1.5	0	35.77	42	0.852
	30	34.48	40	0.862
	60	29.46	34	0.866
	90	26.02	30	0.867
	120	20.31	24	0.846
3.78	0	35.34	41	0.862
	30	25.01	30	0.834
	60	19.19	24	0.800
	90	18.36	24	0.765
	120	13.35	18	0.742

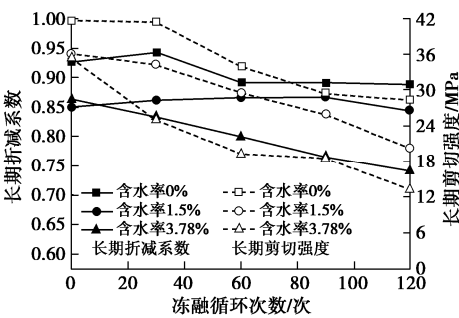


图 7 长期折减系数及长期剪切强度随冻融循环次数的变化  
Fig. 7 Long-term shear strengths and reduction coefficients of red sandstone samples varying with freeze-thaw cycles







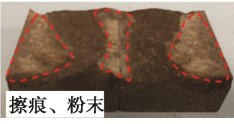
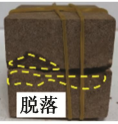
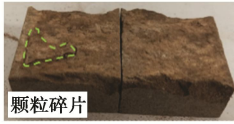
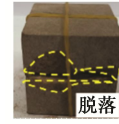
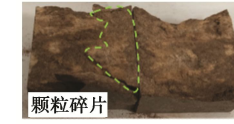
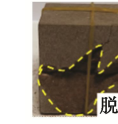
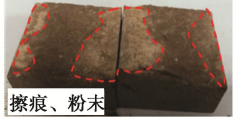

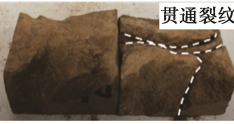
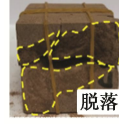
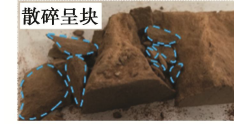

3.3 宏观破坏形态

表 3 给出了冻融 0, 60 及 120 次后干燥、饱水及饱和红砂岩试样的剪切蠕变破坏形态, 从表中可以看出, 干燥且无冻融循环的红砂岩在多级加载破坏后断面较为平整, 断面四周保持较好的完整性; 冻融 60 次后断面四周出现轻微掉块现象; 冻融 120 次后断面出现小部分起伏。饱水与饱和无冻融红砂岩试样的断面上残留一部分错动擦痕; 冻融 60 次后饱水试样的断



表 3 不同含水率冻融 0, 60 和 120 次后红砂岩剪切蠕变破坏形态

Table 3 Shear creep failure modes of red sandstone samples subjected to freeze-thaw cycles of 0, 60 and 120 under different water contents

含水率/%	冻融 0 次		冻融 60 次		冻融 120 次	
	断面特征	破坏形态	断面特征	破坏形态	断面特征	破坏形态
0 (干燥)	 断面较为平整，断面四周保持较好的完整性		 断面较为平整，颗粒间黏聚紧密，边缘出现轻微脱落现象	 脱落	 断面出现小部分面积的起伏，大体还算平整，边缘有轻微碎裂	 脱落
1.5 (饱水)	 擦痕、粉末 断面上残留一部分错动擦痕，擦痕上夹杂着许多细微粉末，断面四周出现小部分脱落。	 脱落	 颗粒碎片 断面凹凸不平，上部还残留大块松动的颗粒碎片，四周岩块小面积脱落	 脱落	 颗粒碎片 断面粗糙度相较于冻融 60 次有所增加，四周岩块脱落面积更大	 脱落
3.78 (饱和)	 擦痕、粉末 断面上粗糙度增加，上部残留着许多细微粉末，断面四周出现小部分脱落。	 脱落	 贯通裂纹 断面出现多组裂纹贯通，四周岩块大面积脱落	 脱落	 散碎呈块 多个劈裂面相互组合，加上四周掉块严重，散碎程度大，成形度低	

面凹凸不平，而饱和试样断面出现多组裂纹贯通，四周岩块大面积脱落；在冻融 120 次后，饱水试样的断面粗糙度相较于冻融 60 次时有所增加，且四周岩块脱落面积更大，而饱和试样的破坏形态呈多个劈裂面相互组合，加上四周掉块严重。由此可见，红砂岩试样的含水率越高且经历的冻融循环次数越多，其破坏时断面粗糙度越大且碎裂程度越为严重。

4 红砂岩冻融剪切蠕变模型

4.1 黏弹塑性损伤演化方程

上述试验结果表明，含水率及冻融循环次数的变化显著影响了红砂岩在长期荷载作用下的蠕变特性。从岩石流变力学的观点，描述岩石蠕变特征的力学元件应具有随冻融循环次数及含水率变化的非常定性，在此考虑理想弹性体与黏性体中的剪切模量及黏滞系数与冻融循环次数及含水率相关，即

$$G = G(N, w), \tag{6}$$

$$\eta = \eta(N, w), \tag{7}$$

式中， $G$  为剪切模量， $\eta$  为黏滞系数， $N$  与  $w$  为冻融循环次数及含水率。

考虑时效性损伤的累积具有随时间变化的连续型随机分布特征，在此引入时效损伤变量，即

$$D = \int \frac{\partial F}{\partial t} dt, \tag{8}$$

式中， $D$  为时效损伤变量， $F$  为连续型损伤变量的概率分布函数，引入高斯分布定义概率密度函数，即

$$f(t, n, m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2n^2}}, \tag{9}$$

式中， $m$  和  $n$  为表征时效性损伤演变规律的特征参数。根据密度函数，损伤变量可定义为

$$\begin{aligned} D(t, n, m) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \int \exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2n^2}\right] dt \\ &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t-m}{n\sqrt{2}}\right) \right], \end{aligned} \tag{10}$$

式中， $\operatorname{erf}(t)$  是高斯误差函数，以超越积分的形式表示为

$$\operatorname{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp(-x^2) dx. \tag{11}$$

通常，描述岩石蠕变黏塑性变形的本构方程可以表示为

$$\frac{\partial \gamma_{vp}}{\partial t} = \frac{\tau}{\eta_{vs}} \left\langle \phi \left( \frac{W}{W_0} \right) \right\rangle, \tag{12}$$

式中， $\gamma_{vp}$  为黏塑性应变， $\tau$  为剪应力， $W$  为屈服函数， $W_0$  为屈服函数的初值， $\langle \rangle$  为条件判断函数。考虑到岩石在剪切荷载作用下破坏，引入莫尔-库仑准则定义红砂岩的屈服函数，因此， $W$  可以定义为

$$W = \tau - \tau_s = \tau - (\tan \phi_1 \sigma_n + c_1), \tag{13}$$

式中， $\tau_s$  是长期抗剪强度， $\sigma_n$  是正应力， $\phi_1$  是长期内摩擦角， $c_1$  是长期内聚力。选择相关流动准则确定  $W_0$ ，当  $W \geq 0$ ， $W_0 = 1$ 。因此，根据莫尔-库仑准则，条件判断函数可定义为

$$\left\langle \phi \left( \frac{W}{W_0} \right) \right\rangle = \begin{cases} 0 & W < 0 \\ 1 & W \geq 0 \end{cases}. \tag{14}$$

将式 (7)，(10)，(13) 和式 (14) 代入式 (12)，

满足

$$\gamma_{vp}(t, \tau, m, n, N, w) = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_s \\ \frac{2\sqrt{2}\tau t}{\eta_{vs}(N, w) \left[ \sqrt{2} - 2 \int_0^{\frac{t-m}{n\sqrt{2}}} e^{-x^2} dx \right]} & \tau \geq \tau_s \end{cases} \quad (15)$$

#### 4.2 冻融损伤蠕变本构模型

一般而言, 理想弹性体可描述岩石蠕变中的弹性变形特征, 其本构方程满足虎克定律, 表示为

$$\gamma_e = \tau_1 / G_e, \quad (16)$$

式中,  $G_e$  是理想弹性体的剪切模量,  $\tau_1$  是理想弹性体的剪应力。Kelvin 体通常运用于描述岩石蠕变中的黏弹性变形特征, 其由理想弹性体和理想黏性体并联组成, 理想黏性体的本构方程满足牛顿黏性定律, 因此 Kelvin 体的本构方程可表示为

$$\gamma_{ve}(t) = \left( 1 - e^{-\frac{G_{ve}t}{\eta_{ve}}} \right) \frac{\tau_2}{G_{ve}}, \quad (17)$$

式中,  $G_{ve}$  为 Kelvin 体中理想弹性体的剪切模量,  $\eta_{ve}$  为 Kelvin 体中理想黏性体的黏滞系数,  $\tau_2$  为 Kelvin 的剪应力。将上述理想弹性体、Kelvin 体与黏塑性体串联, 可推导出一种改进的 Burgers 模型。对于不同含水率冻融后红砂岩而言, 其在加载前具有初始损伤, 结合前文基于 NMR 测试定义的损伤因子, 将其引入到模型构建之中, 即将式 (3), (6) 与式 (7) 代入式 (15), (16) 与式 (17) 之中, 满足:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_1 = \bar{\tau}_2 = \bar{\tau}_3, \\ \gamma = \gamma_e + \gamma_{ve} + \gamma_{vp}, \\ \gamma_e = \bar{\tau}_1 / G_e(N, w), \\ \gamma_{ve} = \left( 1 - e^{-\frac{G_{ve}(N, w)t}{\eta_{ve}(N, w)}} \right) \frac{\bar{\tau}_2}{G_{ve}(N, w)}, \\ \gamma_{vp} = \begin{cases} 0 & (\tau < \tau_s) \\ \frac{2\sqrt{2}\bar{\tau}_3}{\eta_{vs}(N, w) \left[ \sqrt{2} - 2 \int_0^{\frac{t-m}{n\sqrt{2}}} e^{-x^2} dx \right]} & (\tau \geq \tau_s) \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

因此, 总应变可表示为

$$\gamma = \begin{cases} \frac{\bar{\tau}}{G_e(N, w)} + \left( 1 - e^{-\frac{G_{ve}(N, w)t}{\eta_{ve}(N, w)}} \right) \frac{\bar{\tau}}{G_{ve}(N, w)} & (\tau < \tau_s), \\ \frac{\bar{\tau}}{G_e(N, w)} + \left( 1 - e^{-\frac{G_{ve}(N, w)t}{\eta_{ve}(N, w)}} \right) \frac{\bar{\tau}}{G_{ve}(N, w)} + \frac{2\sqrt{2}\bar{\tau}}{\eta_{vs}(N, w) \left[ \sqrt{2} - 2 \int_0^{\frac{t-m}{n\sqrt{2}}} e^{-x^2} dx \right]} & (\tau \geq \tau_s), \end{cases} \quad (19)$$

式 (19) 即为红砂岩冻融剪切蠕变模型的本构方程。

在该蠕变模型推导过程中, 不仅考虑了在含水率控制下的冻融损伤作用对岩石剪切蠕变特征的影响, 且引入了统计损伤理论, 以高斯分布表述时效性损伤的演变规律, 使模型能充分描述岩石在加速蠕变阶段的非线性增长行为, 因此该模型能充分反映不同含水率冻融后红砂岩在各蠕变阶段的变形特征。

#### 4.3 模型参数辨识与验证

依据上述不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变试验结果, 运用数学分析软件1stOpt v8.0, 基于全局通用优化算法对模型进行参数辨识, 限于篇幅, 仅列出冻融120次饱水及饱和试样的蠕变参数辨识结果 (见表4)。从表中可以看出, 随着含水率的增加, 剪切模量和黏滞系数均随之减小, 与上述试验结果相对应。根据模型的识别参数, 将其代入本构方程中得到模型的理论曲线 (如图8所示), 从理论曲线与真实试验数据的对比结果可知, 本文构建的模型与红砂岩蠕变试验数据在任何应力下均有较高的拟合度。且通过对比传统Burgers模型可以看出, 本文模型较完整地弥补了Burgers模型难以描述岩石加速蠕变的不足。以上即验证了模型的正确性及合理性。

表4 不同含水率冻融后红砂岩蠕变模型参数

含水率/%	剪应力 /MPa	$G_e$ /GPa	$G_{ve}$ /GPa	$\eta_{ve}$ /(GPa·h <sup>-1</sup> )	$\eta_{vs}$ /(GPa·h <sup>-1</sup> )	$m$	$n$
1.5	6	0.61	1.68	0.35	—	—	—
	12	1.55	13.81	3.71	—	—	—
	18	1.18	25.22	9.59	—	—	—
	24	2.05	32.55	11.32	15.2	7.6	1.2
3.78	6	0.25	1.47	0.13	—	—	—
	12	1.27	11.6	2.51	—	—	—
	18	1.54	19.75	7.16	8.3	9.8	3.2

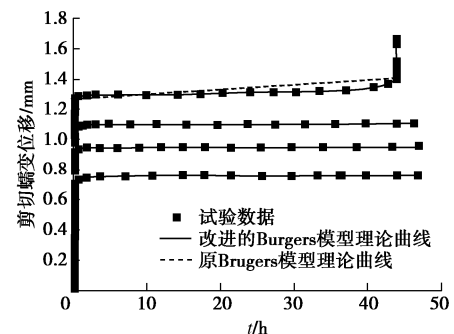


图8 试验曲线与理论曲线对比

Fig. 8 Comparison between creep data and theoretical curves

## 5 结 论

(1) 在冻融循环作用下, 饱水红砂岩试样呈现出由小尺寸孔隙增长向中小尺寸孔隙共同增长的趋势; 而饱和红砂岩试样主要以中大孔隙增长为主。冻融循环作用促进了红砂岩试样各尺寸孔隙的发育, 而含水

率的增加有助于小尺寸孔隙演变为相对更大尺寸的孔隙。

(2) 随着含水率的增加, 冻融后红砂岩的蠕变量随之增大, 而长期强度、屈服应力以及长期折减系数普遍下降; 在屈服应力下试样的蠕变时长更短, 且更易表现出加速蠕变特征。在多级加载破坏后, 试样的剪切断面粗糙起伏度增大, 破碎更为严重。

(3) 基于核磁共振测试结果定义的损伤因子, 以及考虑冻融与时效性损伤的黏弹塑性本构关系, 构建了冻融红砂岩剪切蠕变本构模型。结合试验数据通过全局优化算法验证了模型的正确性及合理性, 表明模型能较好地描述红砂岩各蠕变阶段的变形特征。

### 参考文献:

- [1] 李 男, 徐 辉, 胡 斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 439 - 443. (LI Nan, XU Hui, HU Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 439 - 443. (in Chinese))
- [2] 张泽林, 吴树仁, 王 涛, 等. 甘肃天水泥岩剪切蠕变行为及其模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3603 - 3617. (ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, WANG Tao, et al. Study on shear creep behavior and its model of mudstone in Tianshui, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3603 - 3617. (in Chinese))
- [3] WANG X G, HU B, TANG H M, et al. A constitutive model of granite shear creep under moisture[J]. Journal of Earth Science, 2016, **27**(4): 677 - 685.
- [4] MA C, ZHAN H B, YAO W M, et al. A new shear rheological model for a soft interlayer with varying water content[J]. Water Science and Engineering, 2018, **11**(2): 131 - 138.
- [5] 杨秀荣, 姜谟男, 江宗斌. 含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 1): 167 - 174. (YANG Xiu-rong, JIANG An-nan, JIANG Zong-bin. Creep test and damage model of soft rock under water containing condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S1): 167 - 174. (in Chinese))
- [6] WANG Y Y, WU Y, FAN X Y, et al. Study of the temperature dependence of the uniaxial creep property of similar material of new soft rock[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, **93**(1): 012022.
- [7] HOU R, ZHANG K, TAO J, et al. A nonlinear creep damage coupled model for rock considering the effect of initial damage[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018(2): 1 - 11.
- [8] 王 宇, 李建林, 刘 锋. 坝基软弱夹层剪切蠕变及其长期强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3378 - 3384. (WANG Yu, LI Jian-lin, LIU Feng. Experimental research on shear creep and its long-term strength of weak intercalation in dam foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3378 - 3384. (in Chinese))
- [9] 刘文博, 张树光, 陈 雷, 等. 基于统计损伤原理的岩石加速蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9): 1696 - 1704. (LIU Wen-bo, ZHANG Shu-guang, CHEN Lei, et al. Accelerated creep model for rock based on statistical damage principle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1696 - 1704. (in Chinese))
- [10] 熊良宵, 虞利军, 杨昌斌. 硬性结构面的剪切流变模型及试验数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 2894 - 2899. (XIONG Liang-xiao, YU Li-jun, YANG Chang-bin. Shear rheological model for hard structural surface and test numerical analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 2894 - 2899. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 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))
- [14] 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 Ren-jie, JI Feng, FENG Wen-kai, et al. Shear creep characteristics and constitutive model of hidden



- non-persistent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **41**(12): 2253 - 2261. (in Chinese))
- [15] 张峰瑞, 姜谏男, 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. Study of shear creep experiment and model of granite under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 509 - 519. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 沈 为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. (SHEN Wei. Damage Mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1995. (in Chinese))
- [18] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(1): 138 - 146. (LIU Xin-xi, LI Sheng-nan, ZHOU Yan-ming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(1): 138 - 146. (in Chinese))
- [19] 马芹永, 郁培阳, 袁 璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(3): 593 - 600. (MA Qin-yong, YU Pei-yang, YUAN Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(3): 593 - 600. (in Chinese))

### 第三届全国软土工程学术会议第一号通知(征文)

第一届全国软土工程学术会议本着“软土工程的理论创新与工程实践”的主题,于2013年11月在同济大学顺利召开。第二届全国软土工程学术会议围绕着“软土工程的性能与安全”的主题,于2017年11月在天津大学成功举办。第三届全国软土工程学术会议将于2021年11月中旬在南京召开。全国各地软土工程专家学者将欢聚一堂,以“软土工程智能建造”为主题,针对重大软土工程问题、软土工程新理论、新技术以及学科发展进行研讨。

本次会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供机会,届时将邀请土力学与软土工程领域的知名专家学者就软土工程学科的发展作综述报告,共同探讨土力学与软土工程学科的发展趋势,展现最新研究进展和成果。

会议将通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式,大家共享新思想,激发新思维,拓宽新视野,进一步推动我国在软土工程的理论和工程实践等方面的进程,促进我国软土工程领域的可持续发展。

会议主要研讨软土工程的基本理论、实践探索、新技术和

新方法等。征文内容包括以下10个方面。①软土的基本特性与本构关系;②软土工程勘察、测试与智能评价;③软土地基处理创新与智能化施工;④软土基础工程;⑤软土地下工程;⑥软土动力学与地震工程;⑦软土工程数值仿真与信息化技术;⑧绿色软土工程;⑨软土地区重大工程实践;⑩软土工程的其他问题。

应征论文须符合上述征文内容要求,且未公开发表过,作者文责自负,字数一般不超过8000字(6页以内,含图表与公式)。

学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查,录用论文将推荐至《岩土工程学报》增刊、《建筑科学与工程学报》正刊等形式发表。论文格式详见《岩土工程学报》征稿简则,期刊录用论文的版面费按照各期刊要求收取。

论文请通过电子邮件发到大会议秘书处会务邮箱(softsoilseu@163.com),并注明作者的详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。