

干湿-冻融循环下延吉膨胀岩的力学特性 及其应力-应变归一化

曾志雄, 孔令伟, 李晶晶, 李聚昭

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为了研究干湿、冻融和干湿-冻融循环作用对延吉膨胀岩的应力-应变关系、体变特性、抗剪强度的影响, 开展了一系列的固结排水剪切试验。结果表明: 未循环试样的应力-应变关系曲线表现为稳定型或弱应变软化型, 3 种环境作用后试样应力-应变关系曲线呈现出一定的应变软化特性, 剪胀明显, 而且围压越小、循环次数越高的试样软化和剪胀的程度越高; 随着循环次数的增加, 3 种环境作用下试样的黏聚力急剧减小, 而内摩擦角略有增加; 干湿-冻融循环作用下试样的应力-应变关系软化程度最高, 剪胀最显著, 试样的黏聚力降低的幅度最大。基于 Konder 双曲线模型, 对循环处理前后试样的应力-应变特性进行归一化分析, 建立了考虑干湿-冻融循环次数和围压影响, 能同时描述应变软化型和硬化型的应力-应变关系式, 并对不同干湿-冻融循环次数试样的应力-应变曲线进行预测, 预测值与实测值较为接近, 预测效果较好。

关 键 词: 膨胀岩; 干湿-冻融循环; 应力-应变关系; 抗剪强度; 归一化

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)08-0000-10

Mechanical properties and normalized stress-strain behaviour of Yanji swelling rock under wetting-drying-freezing-thawing cycles

ZENG Zhi-xiong, KONG Ling-wei, LI Jing-jing, LI Ju-zhao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Consolidated drained triaxial shear tests were conducted on Yanji swelling rock to investigate the effects of wetting-drying, freezing-thawing and wetting-drying-freezing-thawing cycles on the stress-strain behaviour, volumetric strain and shear strength. The test results indicate that the stress-strain behaviour of samples before cyclic treatments appears to be strain-hardening, while the samples after cyclic treatments show strain-softening behaviour and more evident shear dilation. Additionally, these behaviours are more pronounced with the increasing number of cycles and the decreasing confining pressure. As the number of cycles increases, the cohesion of samples decreases significantly but the internal friction angle increases slightly. It can also be seen that the samples subjected to wetting-drying-freezing-thawing cycles suffer greater alterations in mechanical behaviours compared with those subjected to separate wetting-drying and freezing-thawing cycles. Subsequently, a stress-strain formula considering the effect of wetting-drying-freezing-thawing cycles and confining pressure was presented based on Konder hyperbolic function, which can describe both strain-hardening and strain-softening behaviours. A comparison between the predicted and measured values verifies that this model can well predict the stress-strain behaviours.

Keywords: swelling rock; wetting-drying-freezing-thawing cycle; stress-strain behaviour; shear strength; normalization

1 引 言

延吉盆地处长白山北麓, 以季风性气候为主,

气温和降水季节变化较大, 夏季高温多雨、冬季寒冷干燥, 具有水热同期的特点^[1]。近年来的重大工程建设发现, 延吉盆地广泛发育着由蒙脱石、伊利

收稿日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41430634); 岩土力学与工程国家重点实验室自主部署项目 (No.Y11002)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41430634) and the Project of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (Y11002).

第一作者简介: 曾志雄, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事特殊土土力学与地基基础方面的研究工作。E-mail: zzhxhp@163.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术方面的研究工作。

E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

石和高岭石等强亲水性矿物组成的膨胀性泥岩，其对环境中的湿热变化极为敏感^[2-4]。气候条件随季节的周期性变化，使得岩土体不可避免地要经历周期性的增湿-减湿和冻结-融化作用，岩土体中液相水、固相冰与水蒸汽间相互转变，同时岩土体与外界环境不断进行着物质和能量的交换，使得颗粒之间的结构联接以及排列方式发生改变^[5-6]。大量的研究表明反复的干湿和冻融循环作用下岩土体的力学性质容易发生劣变，致使工程建设与运行中灾害频发^[7-10]。以往关于膨胀性岩土的研究主要针对南方炎热多雨地区^[11]，主要考虑干湿循环作用的影响，显然无法准确反映延吉膨胀岩力学特性的劣变规律。因此，研究干湿-冻融循环累积作用下延吉膨胀岩的力学特性对于指导季节性冻土区的工程建设具有重要的意义。

岩土体的力学特性一般通过三轴试验得到的应力-应变关系曲线来表示。应力-应变关系曲线大致可以分为3个类型：稳定型、应变硬化型、应变软化型（见图1），其与围压以及试样自身的性质关系密切^[12]。随着围压的变化以及干湿和冻融循环次数的增加，试样的应力-应变关系存在明显的转型现象^[13-15]。为了使岩土体在不同条件下的应力-应变关系能够用一个统一的公式表达，许多学者开展了相关的研究工作。张勇等^[16]以极限偏应力作为归一化因子，建立了武汉软土固结不排水条件下应力-应变特性的归一化方程。常丹等^[15]提出了针对冻融循环下粉砂土的应力-应变关系的归一化因子，建立了粉砂土在不同围压和冻融循环次数下的应力-应变特性的归一化方程。但是张勇^[16]和常丹^[15]等的研究均是针对应变硬化型和稳定型的应力-应变关系，基于Konder双曲线模型建立的归一化方程，无法推广到应变软化型的情况，并不能描述干湿和冻

融循环等复杂环境共同作用下岩土体的应力-应变关系。

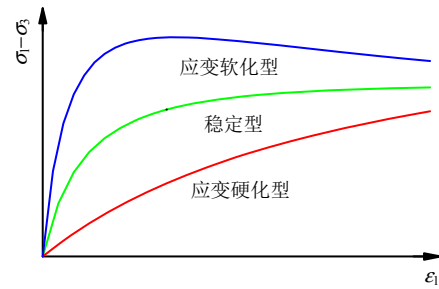


图1 应力-应变曲线类型
Fig.1 Stress-strain curves

基于此，本文以延吉盆地黄褐色膨胀性泥岩（以下简称黄褐色泥岩）为研究对象，考虑当地气候条件，设计了干湿、冻融以及干湿-冻融循环试验，针对循环处理前后的试样开展了固结排水剪切试验，分析了3种环境作用下试样的应力-应变关系、体变特性和抗剪强度随循环次数的变化规律。在此基础上，利用典型的双曲线方程，建立了考虑干湿-冻融循环次数和围压的影响，能同时描述应变软化型和硬化型的应力-应变关系式，并将模型预测结果与三轴试验结果进行对比。

2 试样制备和试验方法

2.1 试样制备

试样取自吉林至珲春铁路客运专线K275处（地理坐标为42° 57'14"N, 129° 30'36"E），属于白垩系上统龙井组（K₂1）。黄褐色泥岩极破碎，节理裂隙发育，呈坚硬状，泥状结构。其基本物理性质和矿物组成如表1所示，黏土矿物含量为28.2%，自由膨胀率为54%，经判定具有弱膨胀性。

表1 黄褐色泥岩的基本物理性质和矿物组成

Table 1 Basic physical properties and mineral compositions of the yellow-brown mudstone

天然 含水率 w /%	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	土粒相对 密度 G_s	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性 指数 I_p /%	自由膨 胀率 α_r /%	体缩率 e_s /%	收缩 系数 λ_n	缩限 w_s /%	矿物相对含量/%				
										蒙脱石	伊利石	白云石	石英	长石
20.0	1.67	2.72	25.6	41.4	15.8	54	14.0	0.49	13.9	23.0	5.2	3.1	23.5	45.2

为了减小干湿、冻融和干湿-冻融循环处理产生的不均匀裂隙对试验结果的影响，保证相同循环次数后试样的均一性，试验采用直径为61.8 mm，高度为125 mm的圆柱试样。将黄褐色泥岩风干碾碎过2 mm筛，按照20.0%的含水率向土样中加水，拌合均匀后密封静置2 d，以控制干密度为1.67 g/cm³

的方法静压制成圆柱形试样，共制备试样64个，分为16组，每组4个。

2.2 试验方法

试验利用KB-TH-S-150Z可程式恒温恒湿试验箱（见图2）模拟延吉盆地气候环境对试样进行干湿、冻融以及干湿-冻融循环，每种环境下分别进

行 1、2、4、6、8 次循环。具体实施过程如下:

(1) 为了模拟延吉盆地 6~10 月的湿热环境, 将试样放入恒温恒湿箱中, 在温度为 25 °C、湿度为 75% 的环境中脱湿, 当试样的含水率达到 14.0% (缩限附近) 时停止脱湿, 将试样抽气饱和后, 再次放入恒温恒湿箱中脱湿至含水率为 20.0%, 即为 1 次干湿循环。

(2) 为了模拟延吉盆地 11 月至翌年 5 月的冻融环境, 将试样用保鲜膜包裹 (不考虑冻融循环过程中试样含水率变化) 放入恒温恒湿箱中, 在温度为 -15 °C 的环境中冻结 12 h, 在温度为 15 °C 的环境中融化 12 h, 即为 1 次冻融循环。

(3) 为了模拟延吉盆地常年的气候环境, 将试样在温度为 25 °C、湿度为 75% 的环境中脱湿至含水率为 14.0%, 抽气饱和, 然后再脱湿至含水率为 20.0%, 随后将试样用保鲜膜包裹, 在温度为 -15 °C 的环境中冻结 12 h, 在温度为 15 °C 的环境中融化 12 h, 即为 1 次干湿-冻融大循环。

将未处理和循环处理后的试样进行真空抽气饱和, 装入压力室中, 分别在 50、100、200 kPa 和 300 kPa 围压下固结稳定后, 保持围压不变以控制应变的方式施加偏应力进行排水剪切, 剪切过程中控制剪切速率为 0.015 mm/min, 轴向应变速率约为 0.012%/min, 以轴向应变达到 20% 作为终止加荷的标准。



图 2 KB-TH-S-150Z 可编程恒温恒湿箱

Fig.2 Temperature and humidity controlled container

3 干湿-冻融循环下延吉膨胀岩的力学特性

3.1 应力-应变关系

3 种环境作用下偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变 ε_1 之间的关系随循环次数的变化规律如图 3 所示。未循环试样的应力-应变关系曲线表现为稳定型或弱

应变软化型, 剪应力随着应变的增加先迅速增大后逐渐趋于稳定。干湿、冻融和干湿-冻融循环作用后试样的应力-应变关系呈现出一定的应变软化特性, 而且围压越小, 软化的程度越高。3 种环境作用下, 试样的破坏强度随循环次数的增加呈减小的趋势。

对比 3 种环境作用下的应力-应变关系曲线可以发现, 干湿-冻融循环作用下试样的应力-应变关系软化程度最高。相同围压下, 干湿-冻融循环作用下试样随着循环次数的增加破坏强度降低的幅度最大, 冻融循环作用下试样破坏强度降低的幅度最小。这表明干湿和冻融共同作用下会进一步加剧膨胀岩力学性能恶化, 季节性冻土地区的岩土工程建设只考虑干湿或冻融循环的影响是偏于危险的。

3.2 体变特性

固结排水剪切试验中通过量测排水体积得到体应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 的关系如图 3 所示。3 种环境作用下试样在应变初始阶段的体变均为正, 表现为剪缩。随着轴向应变的增加, 低围压 (50、100、200 kPa) 下试样剪胀显著, 试样体积随着轴向应变的增加先减小后逐渐增大, 体变曲线出现一个明显的拐点, 体变曲线的拐点与强度峰值对应的应变基本是相同的。剪胀后孔隙比增大, 剪切抗力下降, 发生应变软化现象, 围压越低、循环次数越多的试样剪胀程度越大, 应变软化现象越明显。当围压较高 (300 kPa) 时, 试样剪胀被抑制, 其应变软化现象也较弱。

对比 3 种环境作用下试样的体应变 ε_v 与应变 ε_1 关系曲线, 可以发现相同循环次数下, 干湿-冻融循环后试样在剪切过程中的体积变化最大, 低围压下剪胀显著, 应变软化现象最明显。

3.3 抗剪强度

根据图 3 中的应力-应变曲线, 按其曲线类型, 应变软化型曲线取剪切强度为破坏时的偏应力, 应变硬化型曲线以轴向应变达到 15% 的偏应力为破坏标准^[17], 拟合得到 3 种环境作用下试样的抗剪强度参数, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随循环次数的变化规律如图 5 所示。未循环试样的黏聚力为 64.90 kPa, 内摩擦角为 24.53°, 随着循环次数的增加, 黏聚力逐渐减小, 而内摩擦角则呈现出增大的趋势。其中第 1 次循环后试样抗剪强度参数变化最明显, 干湿循环 4 次、冻融循环 6 次、干湿-冻融循环 6 次后逐渐趋于稳定。干湿循环后试样干缩裂隙发育, 冻融循环后试样体积增加, 孔隙比增加, 干湿-冻融循环后试样表面产生的干缩裂隙在冻胀力作用下长度变长, 宽度增大。常丹^[10]和 Yu^[18]等认为岩土体的黏

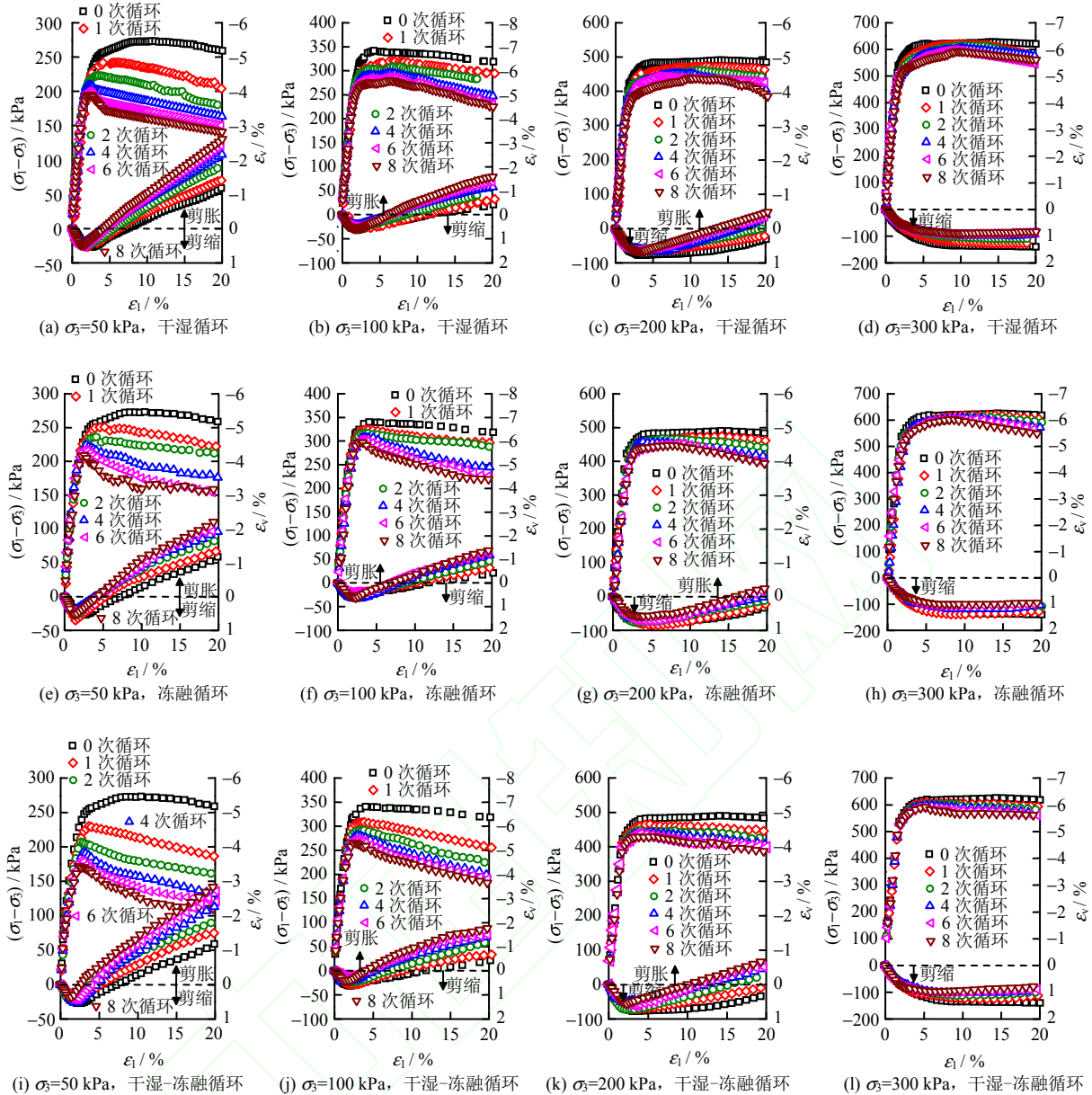


图3 不同循环次数下试样的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和体应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 之间的关系

Fig.3 Deviatoric stress and volumetric strain versus axial strain curves of samples after different cycles

聚力取决于颗粒之间胶结作用的强度, 而内摩擦角受控于颗粒的粗糙程度。干湿循环作用下试样产生的干缩裂隙以及冻融循环作用下颗粒间距离的增加是试样黏聚力下降的主要原因。内摩擦角随循环次数的增大主要是缘于干燥过程中的基质吸力和冻结过程中的冻胀力会对颗粒产生挤压作用, 使得颗粒内部的孔隙减小, 质地变硬, 颗粒发生相对位移的阻力增大^[19]。3种环境中, 冻融循环作用对试样的抗剪强度的影响最小, 干湿-冻融循环作用影响程度最大, 8次干湿-冻融循环后试样的黏聚力下降为28.61 kPa, 内摩擦角增加至27.06°。经拟合, 得出3种环境作用下延吉膨胀岩的黏聚力、内摩擦角与循环次数的关系如图4所示。

4 干湿-冻融循环下应力-应变归一化特性分析

4.1 归一化因子选取

三轴试验得到应变硬化型和稳定型的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系常常用Konder双曲线进行描述^[16], 其方程为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (2)$$

式中: a 和 b 为双曲线的两个参数。将应力-应变关系绘制在 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 坐标系中, 可以发现 $\varepsilon_1 /$

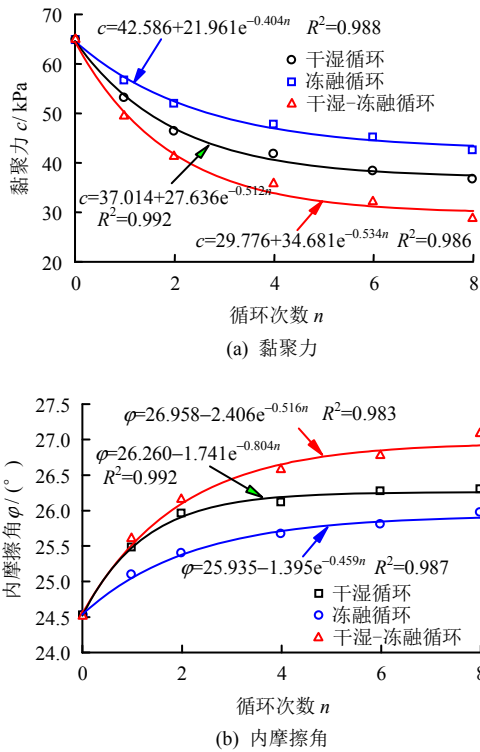


图 4 抗剪强度参数 c 、 ϕ 随循环次数 n 的变化规律

Fig.4 Relationships of c and ϕ with the number of cycles n

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 呈线性关系，拟合直线在 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 轴上的截距即为参数 a ，直线的斜率为参数 b 。参数 a 的倒数即为初始切线模量 E ，参数 b 的倒数即为极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 。

如果在式 (2) 两边同时乘以归一化因子 X ，可得

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} X = Xa + Xb\varepsilon_1 \quad (3)$$

其归一化条件为

$$\left. \begin{aligned} Xa &= \frac{X}{E} = M \\ Xb &= \frac{X}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = N \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： M 、 N 分别为常数。为了同时考虑围压和干湿-冻融循环作用的影响，选取初始切线模量 E 为归一化因子，则式 (4) 可以表示为

$$\frac{E}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = N \quad (5)$$

即初始切线模量 E 与极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 成正比例关系。

4.2 未循环试样应力-应变归一化

未经干湿-冻融循环试样的应力-应变关系曲线具有明显的双曲线形态，将不同围压下未循环试样的应力-应变关系绘制在 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 与 ε_1 坐标系

中 (见图 5)，利用式 (2) 对曲线进行线性拟合，拟合结果见表 2。

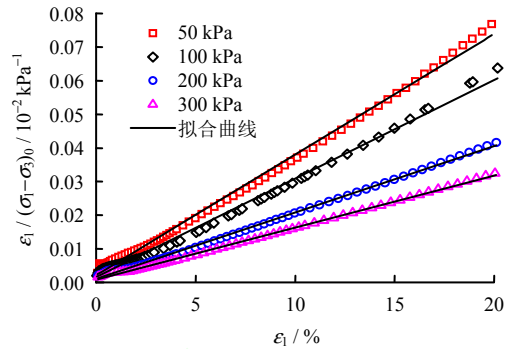


图 5 未循环试样 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 与轴向应变 ε_1 之间的关系

Fig.5 Relationship between $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ and ε_1

表 2 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 与 ε_1 关系拟合结果

Table 2 Fitting results for $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_0 - \varepsilon_1$ curves

σ_3 / kPa	a / $\times 10^5$	b / $\times 10^3$	E_0 / kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ / kPa	R^2
50	2.127	3.588	47 019	279	0.996
100	1.567	2.672	63 812	374	0.995
200	1.029	1.977	97 181	506	0.998
300	0.961	1.518	104 012	659	0.998

未循环试样在不同围压下的初始切线模量 E_0 与极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之间的关系如图 6 所示，二者之间的关系可以表示为

$$E_0 = 170.4(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (6)$$

拟合优度为 0.914，表明未循环试样的初始切线模量 E_0 与极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之间具有较强的正比例相关关系。

初始切线模量 E_0 与围压 σ_3 之间的关系如图 7 所示， E_0 与 σ_3 大致呈线性关系，拟合直线方程为

$$E_0 = 39 807.58 + 235.07\sigma_3 \quad (7)$$

拟合优度高达 0.923，二者之间具有高度的线性关系。

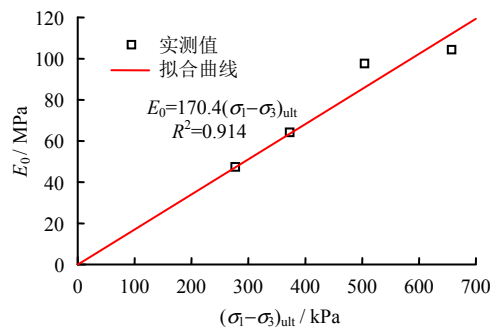


图 6 初始切线模量 E_0 与极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之间的关系

Fig.6 Relationship between E_0 and $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$

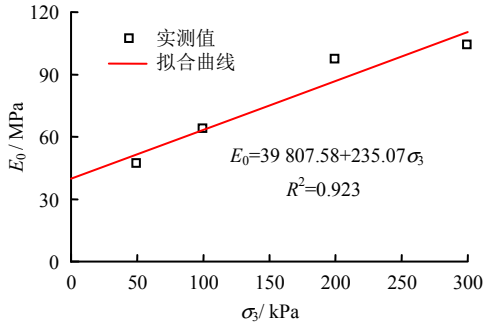


图7 初始切线模量 E_0 与围压 σ_3 之间的关系
Fig.7 Relationship between E_0 and σ_3

由以上分析可知, 初始切线模量 E_0 与极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之间具有较强的正比例关系, 满足以 E_0 为归一化因子的条件, 因此, 采用 E_0 作为归一化因子对未循环试样不同围压下的应力-应变关系进行归一化。未循环试样 $E_0 \varepsilon_1 (\sigma_1 - \sigma_3)_0^{-1}$ 与 ε_1 之间的关系如图 8 所示。 $E_0 \varepsilon_1 (\sigma_1 - \sigma_3)_0^{-1}$ 与 ε_1 呈线性关系, 拟合得到归一化方程:

$$E_0 \frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0} = 1.019 + 175.562 \varepsilon_1 \quad (8)$$

拟合优度为 0.984, 拟合效果较好。

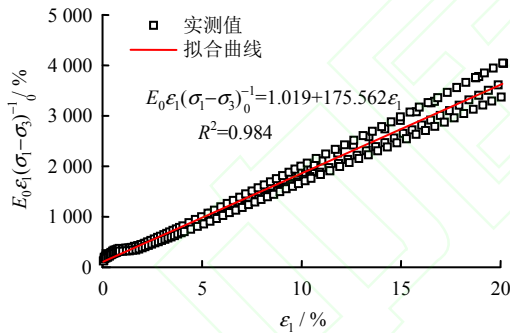


图8 未循环试样应力-应变关系归一化曲线
Fig.8 Normalized stress-strain curves of samples before cyclic treatments

联立式 (7) 和 (8), 得到未循环试样的应力-应变关系表达式

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_0 = \frac{39\ 807.58 + 235.07 \sigma_3}{1.019 + 175.562 \varepsilon_1} \varepsilon_1 \quad (9)$$

4.3 干湿-冻融循环下应力-应变归一化

由前面的分析可知, 经过干湿-冻融循环作用后试样的应力-应变关系主要呈软化型, 无法直接用 Konder 应力-应变关系双曲线方程进行描述。而相同围压水平下循环后试样与未循环试样在同一应变下的偏应力之差却随着轴向应变的增加呈递增的趋势, 为此将相同围压水平下循环后试样与未循环试样在同一应变下的偏应力之差定义为偏应力衰减

$$\Delta q = (\sigma_1 - \sigma_3)_0 - (\sigma_1 - \sigma_3)_n \quad (10)$$

式中: Δq 为 n 次循环后试样的偏应力衰减; $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_n$ 分别为未循环和 n 次循环后试样的偏应力。根据图 3(i)~3(l) 中的应力-应变关系得到不同干湿-冻融循环次数下偏应力衰减 Δq 与轴向应变 ε_1 的关系如图 9 所示。围压越小, 循环次数越大, 偏应力衰减 Δq 越大。 Δq 与 ε_1 之间的关系呈硬化型, 具有明显的双曲线特征, $\varepsilon_1 / \Delta q$ 与 ε_1 之间具有较强的线性关系, 线性拟合得到双曲线参数 a 和 b 如表 3 所示。

分别计算 a 和 b 的倒数得到不同干湿-冻融循环次数下试样的初始切线模量衰减 ΔE 和极限偏应力衰减 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 。 ΔE 和 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 均随着围压的增加而减小, 随循环次数的增加而增大。 ΔE 和 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之间的关系如图 10 所示, 可以用正比例函数进行拟合

$$\Delta E = 15.544 \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (11)$$

拟合优度为 0.795, ΔE 与 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 具有较好的正比例关系, 表明 $\Delta q - \varepsilon_1$ 关系可以用 ΔE 为归一化因子进行归一化。

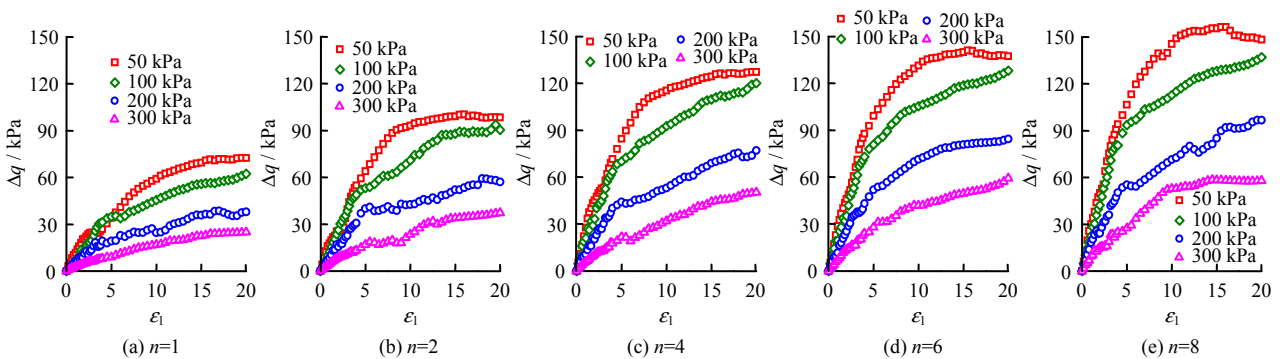


图9 不同干湿-冻融循环次数下试样的应力衰减 Δq 与轴向应变 ε_1 之间的关系

Fig.9 Relationship between Δq and ε_1 after different wetting-drying-freezing-thawing cycles

表 3 $\varepsilon_1/\Delta q$ 与 ε_1 关系拟合结果
Table 3 Fitting results for $\varepsilon_1/\Delta q$ - ε_1 curves

n	σ_3 / kPa	A / $\times 10^{-4}$	B / $\times 10^{-3}$	ΔE / kPa	$\Delta(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ / kPa	R^2	D ($\Delta E/E_0$)
1	50	8.422	9.087	1187	110	0.956	0.025 3
	100	11.680	10.193	856	98	0.931	0.013 4
	200	15.610	18.977	641	53	0.962	0.006 6
	300	37.513	20.582	267	49	0.952	0.002 6
2	50	4.893	6.916	2 044	145	0.946	0.043 5
	100	6.388	7.357	1 566	136	0.967	0.024 5
	200	9.225	12.929	1 084	77	0.974	0.011 2
	300	22.550	16.096	443	62	0.889	0.004 3
4	50	3.056	6.011	3 272	166	0.991	0.069 6
	100	4.068	6.469	2 458	155	0.995	0.038 5
	200	7.359	9.874	1 359	101	0.978	0.014 0
	300	17.895	11.624	559	86	0.920	0.005 4
6	50	2.757	5.394	3 628	185	0.980	0.077 2
	100	3.594	6.004	2 782	167	0.991	0.043 6
	200	5.988	8.483	1 670	118	0.990	0.017 2
	300	12.858	11.288	778	89	0.990	0.007 5
8	50	2.489	4.939	4 018	202	0.975	0.085 5
	100	3.178	5.676	3 147	176	0.989	0.049 3
	200	5.620	7.907	1 779	126	0.983	0.018 3
	300	10.981	10.449	911	96	0.944	0.008 8

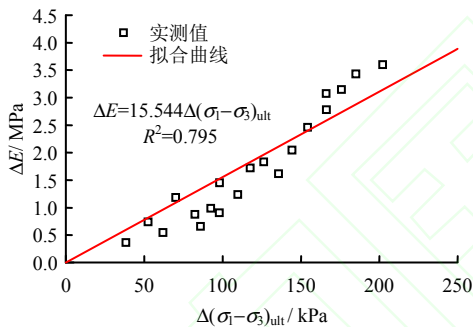


图 10 初始切线模量衰减 ΔE 和极限偏应力衰减 $\Delta(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 之间的关系

Fig.10 Relationship between ΔE with $\Delta(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$

由不同围压、不同干湿-冻融循环次数下的 Δq - ε_1 试验数据,对 $\Delta E\varepsilon_1\Delta q^{-1}$ - ε_1 关系进行线性拟合(见图 11),得到归一化方程为

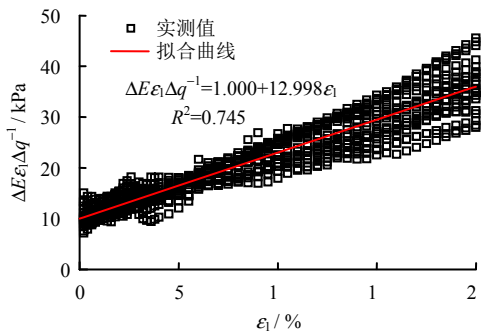


图 11 不同围压、循环次数下 Δq - ε_1 的归一化曲线

Fig.11 Normalized Δq - ε_1 curves under different confining pressures and wetting-drying-freezing-thawing cycles

$$\Delta E \frac{\varepsilon_1}{\Delta q} = 1.000 + 12.998\varepsilon_1 \quad (12)$$

其拟合优度为 0.745, 具有较好的归一性。根据式 (12), Δq 可以表示为

$$\Delta q = \frac{\Delta E}{1.000 + 12.998\varepsilon_1} \varepsilon_1 \quad (13)$$

为了进一步分析干湿-冻融循环次数和围压对试样应力-应变关系的影响,将循环后试样初始切线模量衰减与未循环试样的初始切线模量记为损伤变量

$$D = \frac{\Delta E}{E_0} \quad (14)$$

将式 (7) 和式 (14) 代入式 (13) 中, 可得

$$\Delta q = \frac{D(398.076 + 2.351\sigma_3)}{1.000 + 12.998\varepsilon_1} \varepsilon_1 \quad (15)$$

将式 (9) 和式 (15) 代入式 (10) 中得到干湿-冻融循环后试样的偏应力表达式为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_n = \frac{39\ 807.58 + 235.07\sigma_3}{1.019 + 175.562\varepsilon_1} \varepsilon_1 - \frac{D(39\ 807.58 + 235.07\sigma_3)}{1.000 + 12.998\varepsilon_1} \varepsilon_1 \quad (16)$$

式 (16) 即为本文以 E_0 和 ΔE 为归一化因子建立的考虑干湿-冻融循环次数和围压的应力-应变关系式。

根据表 2、3 中的数据, 分别计算不同循环次数后试样的损伤变量 D (见表 3)。损伤变量随着循环次数的增加逐渐增大, 随着围压的增加而减小。损伤变量 D 与围压 σ_3 的关系如图 12 所示, 其与围压 σ_3 之间的关系可以用式 (17) 进行拟合

$$D = A + Be^{-C\sigma_3} \quad (17)$$

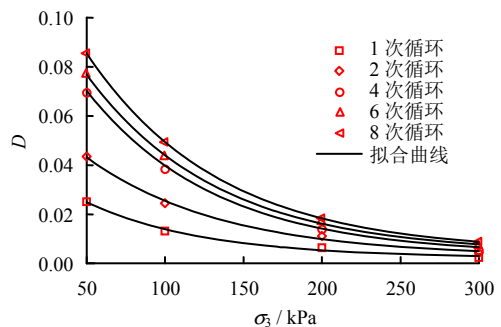


图 12 损伤变量 D 与围压 σ_3 的关系

Fig.12 Relationship between D with σ_3

式中： A 、 B 、 C 均为拟合参数。拟合结果如表4所示，参数 C 基本保持不变，取其均值0.0122。未循环试样的初始切线模量衰减 ΔE 为0，易知相应的 A 、 B 均为0，参数 A 、 B 逐渐随循环次数的增加而增大（见图13），其与循环次数 n 的关系可以用双曲线方程进行拟合，拟合结果如下

$$A = \frac{n}{322.881 + 188.060n} \quad (18)$$

$$B = \frac{n}{16.920 + 4.010n} \quad (19)$$

将 A 、 B 、 C 的值代入式(17)中，得到损伤变量 D 与干湿-冻融循环次数 n 和围压 σ_3 之间的关系式

$$D = \frac{n}{322.881 + 188.060n} + \frac{n}{16.920 + 4.010n} e^{-0.0122\sigma_3} \quad (20)$$

当 n 为0时， $D=0$ ， Δq 为0，因此，式(16)对于未循环和循环后试样的应力-应变关系均适用，且能同时描述应变硬化型和软化型应力-应变关系。利用式(16)和式(20)对不同干湿-冻融循环次数下的应力-应变曲线进行预测，结果如图14所示，计算值与实测值较为接近，预测效果较好，利用此

方法能够对不同干湿-冻融循环次数延吉膨胀岩试样的应力-应变关系进行很好地预测。

表4 损伤变量拟合结果
Table 4 Fitting results for damage variable D

n	A	B	C	R^2
1	0.002 21	0.044	0.013 3	0.979
2	0.002 77	0.072	0.011 6	0.990
4	0.003 37	0.123	0.012 2	0.999
6	0.004 19	0.132	0.012 0	0.999
8	0.004 57	0.146	0.011 8	1.000

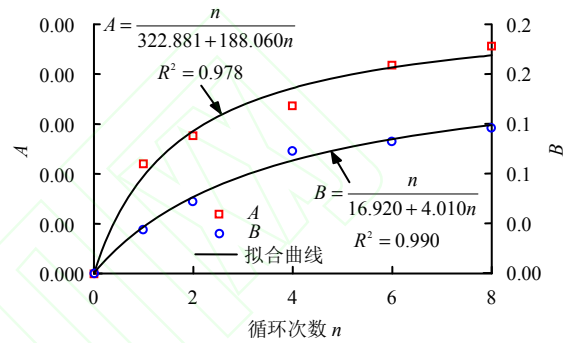


图13 拟合参数 A 和 B 随干湿-冻融循环次数的变化
Fig.13 Fitting parameters A and B with the number of wetting-drying-freezing-thawing cycles n

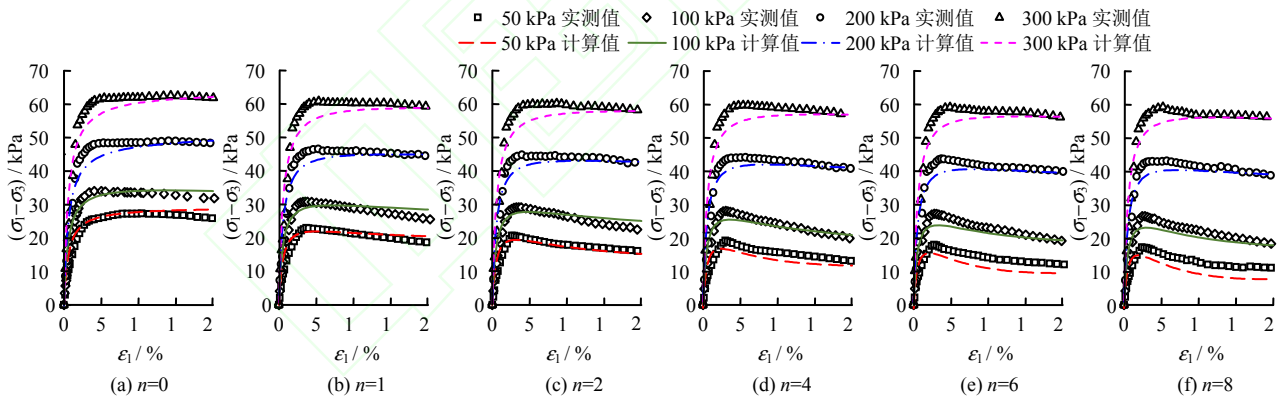


图14 不同干湿-冻融循环次数试样的应力-应变预测曲线
Fig.14 Predicted stress-strain curves of samples after different wetting-drying-freezing-thawing cycles

5 结论

(1)未循环试样的应力-应变关系曲线表现为稳定型或弱应变软化型，干湿、冻融和干湿-冻融循环作用后试样应力-应变关系曲线呈现出一定的应变软化特性，剪胀明显，而且围压越小、循环次数越大的试样软化和剪胀的程度越高。随着循环次数的增加，3种环境作用下试样的黏聚力急剧减小，而内摩擦角略有增加。第1次循环对试样的力学特性影响最大，4次循环以后试样的性质逐渐趋于稳定。

对比3种环境作用下的试验结果，发现干湿-冻融循环作用后试样的应力-应变关系软化程度最高，剪胀最显著，抗剪强度参数变化的幅度最大。

(2)基于Konder双曲线模型，以初始剪切模量 E_0 作为归一化因子，建立了未循环试样应力-应变关系的归一化方程。在综合分析干湿-冻融循环次数后试样应力-应变关系特性的基础上，以初始剪切模量衰减 ΔE 为归一化因子将循环后试样的偏应力衰减与轴向应变之间的关系进行了归一化，由此推导出考虑干湿-冻融循环次数和围压影响的延吉膨胀

岩应力-应变关系关系式,并对不同干湿-冻融循环次数的应力-应变曲线进行预测。结果显示:预测曲线和试验结果吻合良好,模型预测效果较好;该模型能同时描述应变硬化型和软化型应力-应变关系,具有较强适用性。

(3)本文初步探讨了干湿-冻融循环作用对延吉膨胀岩力学特性的影响,但仅考虑干湿-冻融循环次数的影响,并没有综合考虑不同初始状态、干湿和冻融循环幅度以及干湿和冻融循环组合的影响。此外,受取样和试验条件限制,本文研究工作针对重塑膨胀岩试样,开展大尺寸的力学试验准确模拟工程现场原始膨胀岩的力学特性将是下阶段的研究重点。

参考文献

- [1] 郑景云,尹云鹤,李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3—12.
ZHENG Jing-yun, YIN Yun-he, LI Bing-yuan. A new scheme for climate regionalization in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3—12.
- [2] 谭罗荣,孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. *Engineering behavior of special rock and soil*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [3] 何满潮,冷曦晨,衡朝阳,等. 延边地区公路沿线膨胀性软岩的发现与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1151—1155.
HE Man-chao, LENG Xi-chen, HENG Chao-yang, et al. Research on the expansive soft rock in Yanbian Region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1151—1155.
- [4] 曾志雄,孔令伟,田海,等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1983—1989.
ZENG Zhi-xiong, KONG Ling-wei, TIAN Hai, et al. Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1983—1989.
- [5] 张泽,马巍,齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1904—1914.
ZHANG Ze, MA Wei, QI Ji-lin. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(6): 1904—1914.
- [6] LIU JIAN-KUN, CHANG DAN, YU QIAN-MI. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. *Engineering Geology*, 2016, 210: 23—32.
- [7] ZHANG B Y, ZHANG J H, SUN G L. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subjected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations[J]. *Engineering Geology*, 2015, 190: 87—97.
- [8] HOSSAIN MD SAYEM, KONG LING-WEI, YIN SONG. Effect of drying-wetting cycles on saturated shear strength of undisturbed residual soils[J]. *American Journal of Civil Engineering*, 2016, 4(4): 159—166.
- [9] ALDAOOD ABDULRAHMAN, BOUASKER MARWEN, AL-MUKHTAR MUZAHIM. Impact of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of lime stabilized gypseous soils[J]. *Cold Region Science and Technology*, 2014, 99(1): 38—45.
- [10] 常丹,刘建坤,李旭. 冻融循环下粉砂土屈服及强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1721—1728.
CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu. Experimental study on yielding and strength properties of silty sand under freezing-thawing cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 2015, 34(8): 1721—1728.
- [11] SHI BIN, JIANG HONG-TAO, LIU ZHI-BIN, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China[J]. *Engineering Geology*, 2002, 67(1): 63—71.
- [12] 王成华,李广信. 土体应力-应变关系转型问题分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1185—1190.
WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Analysis of problem of pattern transition in stress-strain relations of soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1185—1190.
- [13] 刘文化,杨庆,唐小微,等. 干湿循环条件下不同初始干密度土体的力学特性[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 261—268.
LIU Wen-hua, YANG Qing, TANG Xiao-wei, et al. Mechanical behaviors of soils with different initial dry densities under drying-wetting cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 261—268.
- [14] 王大雁,马巍,常小晓,等. 冻融循环作用对青藏黏土

- 物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313—4319.
- WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physical-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4313—4319.
- [15] 常丹, 刘建坤, 李旭. 冻融循环下粉砂土应力-应变归一化特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3500—3505.
- CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu. Normalized stress-strain behavior of silty sand under freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3500—3505.
- [16] 张勇, 孔令伟, 孟庆山, 等. 武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1509—1513.
- ZHANG Yong, KONG Ling-wei, MENG Qing-shan, et al. Normalized stress-strain behavior of Wuhan soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1509—1513.
- [17] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [18] YU JIN, CHEN XU, LI HONG, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression[J]. **Journal of Mountain Science**, 2015, 12(1): 218—231.
- [19] ZENG ZHI-XIONG, KONG LING-WEI, WANG MIN, et al. Assessment of the engineering behaviour of an intensely weathered swelling mudstone under the full range of seasonal variation and the relationships among the measured parameters[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2018. doi:10.1139/cgj-2017-0582.