

DOI:10.11918/202404051

# 考虑初始饱和度影响的冻结渠坡膨胀土力学特性

田金博<sup>1</sup>,张勇敢<sup>1,2,3</sup>,鲁洋<sup>1,3</sup>,马文鑫<sup>1</sup>,刘斯宏<sup>1,3</sup>,王柳江<sup>1,3</sup>,刘瑾<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院,南京 210098;2. 河海大学 地球科学与工程学院,南京 211100;  
3. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室(河海大学),南京 210098)

**摘要:**为探究初始饱和度对渠坡膨胀土低温力学特性的影响,以不同初始饱和度渠坡膨胀土为研究对象,通过开展试验温度分别为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的无侧限抗压强度试验,研究温度与初始饱和度对渠坡膨胀土强度及变形特征的影响。试验结果表明:试样的应力-应变曲线随初始饱和度的增加逐渐从软化型过渡到硬化型,两种不同类型的应力-应变关系可分别采用双曲线方程和复合指数本构方程来描述;试样的破坏形态根据其破坏特征可划分为垮塌破坏、鼓胀破坏和整体压缩破坏3种形式; $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,试样的抗压强度整体随初始饱和度的增加而减小,但在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,试样的抗压强度随着初始饱和度的增加先增大后减小,也即存在一个“临界饱和度”使得试样的抵抗破坏能力最强,并且该“临界饱和度”随着试验温度的降低而减小;此外,随着试验温度的降低,试样的弹性模量和抗压强度均逐渐增大,但试样的硬化模量却呈现出先增大后减小的变化规律。

**关键词:**渠坡膨胀土;温度;初始饱和度;抗压强度;破坏形态;模量

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0123-09

## Effect of initial saturation on mechanical properties of frozen canal expansive soil

TIAN Jinbo<sup>1</sup>, ZHANG Yonggan<sup>1,2,3</sup>, LU Yang<sup>1,3</sup>, MA Wenxin<sup>1</sup>, LIU Sihong<sup>1,3</sup>, WANG Liujiang<sup>1,3</sup>, LIU Jin<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;  
3. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams(Hohai University), Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of initial saturation on the low-temperature mechanical properties of canal expansive soil, the unconfined compressive strength tests under  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  were carried out on canal expansive soil with different initial saturation. The effects of temperature and initial saturation on the strength and deformation characteristics of canal expansive soil are discussed. The results show that: the stress-strain curves of the samples gradually transform from softening type to hardening type with the increase of initial saturation. Two different types of stress-strain relationship can be described by hyperbolic equation and composite index equation respectively. According to the failure characteristics, the failure modes of the samples can be divided into three types: collapse failure, bulging failure and overall compression failure. At  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the compressive strength of the sample decreases with the increase of initial saturation, but at  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the compressive strength increases first and then decreases with the increase of initial saturation, there is a “critical saturation” that makes the sample have the strongest resistance to failure, and this “critical saturation” decreases with the decrease of test temperature. In addition, with the decrease of test temperature, the elastic modulus and compressive strength of the sample increase gradually, but the hardening modulus of the sample increase first and then decreases.

**Keywords:** canal expansive soil; temperature; initial saturation; compressive strength; failure modes; modulus

为破解中国水资源时空分布不均的难题,一大批长距离输水渠道工程相继问世,其在实现中国水资源优化调配与高效利用方面发挥着举足轻重的作用,被称为生命线工程<sup>[1]</sup>。然而,由于中国地形、气

候条件极为复杂,大量长距离输水渠道工程不可避免地跨越了冻土区与膨胀土发育地区相互交织的地段。受膨胀土胀缩性、强度衰减性和寒冷气候联合作用的影响,寒区膨胀土地段的渠道工程的冻害问

收稿日期: 2024-04-19;录用日期: 2024-06-25;网络首发日期: 2024-10-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241011.1108.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0105000);国家自然科学基金(52109123);冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE202001)

作者简介: 田金博(1997—),男,博士研究生;刘斯宏(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 鲁洋, [luy@hhu.edu.cn](mailto:luy@hhu.edu.cn)

题普遍且严重<sup>[2-3]</sup>。例如:北疆输水干渠膨胀土渠坡在极端恶劣的自然环境下发生多处滑坡、冻胀隆起破坏<sup>[4]</sup>;东北地区引嫩干渠的膨胀土地段在低温环境下出现大面积衬砌冻胀破坏现象<sup>[5]</sup>。上述渠道的冻害问题与渠坡膨胀土的低温力学特性密切相关。

近年来,为解决上述工程问题,一些学者对膨胀土的低温力学特性开展了探索性研究工作,例如:李新宇等<sup>[6]</sup>对佳木斯膨胀土开展了低温三轴试验,建立了冻结膨胀土力学特性的统计损伤模型;张勇敢等<sup>[7]</sup>通过巴西劈裂试验研究了冻结膨胀土的拉伸特性,得出其抗拉强度与干密度和含水率之间存在正相关的关系;Lu 等<sup>[8]</sup>分析了冻融作用对膨胀土裂缝发育的影响,发现试样在周期性冻融循环作用下的开裂伴随水分的损失,并且与试样的厚度密切相关。以上研究为冻结条件下膨胀土的力学性质探索积累了宝贵经验,但并未考虑渠道实际运行时的水分赋存状态。事实上,为减轻冻害对渠道工程安全稳定性的影响,寒区输水渠道常采用夏季输水-冬季停水的运行模式,导致渠坡土体在冬季一般处于非饱和状态,并且沿渠坡高度方向其饱和度也存在显著差异,上述差异对渠坡膨胀土体的力学特性也会产生显著影响。遗憾的是,现有关于饱和度对膨胀土物理力学特性影响的研究主要聚焦于常温状态<sup>[9-12]</sup>,冻结条件下非饱和膨胀土力学特性的演化规律尚未明确。

鉴于此,本文通过开展不同初始饱和度下渠坡膨胀土的低温无侧限抗压强度试验,研究不同初始饱和度和温度工况下渠坡膨胀土破坏模式、应力-应变关系和应力-应变方程的差异,对比分析渠坡膨胀土抗压强度、弹性模量和硬化模量随温度和饱和度的演化规律,以期为寒区膨胀土渠道的工程设计和灾害防控提供理论参考。

## 1 试验

### 1.1 试验方案

试验用土取自河南省叶县地区南水北调工程现场。首先将密封运回的膨胀土晾晒、风干、粉碎,过 2 mm 筛后装袋封存,依据《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>,测定该土的基本物理性质,其塑限与液限含水率分别为 26.3%、70.8%,自由膨胀率为 59%,属于弱膨胀土<sup>[14]</sup>。为探究初始饱和度对冻结膨胀土强度及破坏特性的影响,首先控制试样的干密度为最大干密度(1.6 g/cm<sup>3</sup>)。试验用土选取地区多年气象统计资料表明该地区近年来最低气温在 -15 ~ -3 ℃<sup>[15]</sup>,而 -2 ℃ 接近该膨胀土的冻结温度<sup>[7]</sup>,因此将试验温度设定为 -15、-10、-5、-2 ℃。对于一个制备完成的试样,其饱和度主要受控于含水率和干密度

两个主要因素,所以在试样干密度控制不变的前提下,在该膨胀土最优含水率的干侧和湿侧各选取两个代表含水率,设置 1.00、0.94、0.86 (最优含水率)、0.78 和 0.70 共 5 组饱和度工况,并在每种温度工况下进行这 5 组不同饱和度试样的抗压强度试验,且每组试验设置 3 个平行试样,共计 60 个试样。

### 1.2 试验流程

大量工程实践表明,寒区渠坡膨胀土的冻害问题具有浅层性特征,且南水北调中线工程沿线土体的冻深相对较浅(40 ~ 70 cm)<sup>[16]</sup>,为准确模拟土体真实受力状态,本文选择开展重塑试样的无侧限压缩试验。试样制备前,需均匀喷洒预定质量的蒸馏水到一定质量的风干土中使其达到试验所需含水率后,装入保鲜袋中静置 48 h 使含水率分布更加均匀。在改进的分层击实装置中装入不同质量的配置完成的土料,分 3 层击实到目标干密度(1.6 g/cm<sup>3</sup>)。其中前两层土料击实后需对其上表面进行刨毛处理。制备完成的圆柱状试样尺寸  $\Phi \times h = 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ,脱模后在其表面包裹保鲜膜密封以减少水分损失。参照 Lai 等<sup>[17]</sup>采用的冻结方式,首先将所有试样在 -30 ℃ 低温中快速冻结 12 h,然后再转移到试验目标温度下恒温养护 12 h。随后,在河海大学低温冻土试验室内的试验机上开展无侧限压缩试验(图 1),室内控温精度为  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试件加载前,提前运行风冷式低温试验室,使室内温度稳定在试验目标温度 2 h 以上,随后将试样从恒温养护箱中快速转移至加载装置上,在 0.8 mm/min (应变率为 1%) 的恒定加载速率下开展低温无侧限抗压强度试验。对于呈现强软化型破坏特征的试样,将轴向应变加载至 20%;而对于呈现弱软化型及硬化型破坏特征的试样,则加载至 30%。

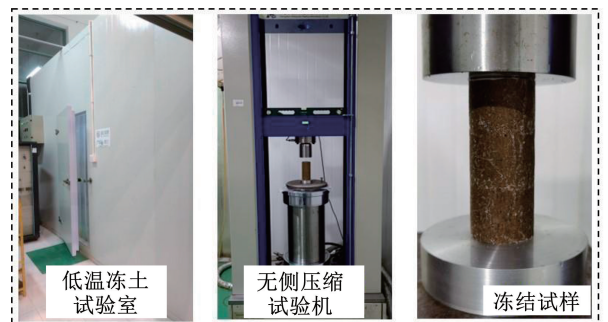


图 1 无侧限抗压试验测试系统

Fig. 1 Testing system of unconfined compressive strength test

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 应力-应变特性

#### 2.1.1 应力-应变曲线

图 2 为各温度下不同饱和度试样的无侧限压缩

应力-应变关系曲线。可以看出,在相同试验温度下,试样的应力-应变关系曲线随试样饱和度的增加由应变软化型过渡为应变硬化型,这是因为随着饱和度的增加,试样内部含冰量、冰-土胶结力均逐渐增大,导致试样粘塑性增强的同时整体抗变形能力也增强,最终呈现硬化型塑性破坏特征<sup>[18]</sup>。此外,伴随试验温度的降低,同一饱和度工况下试样应力-应变关系曲线的硬化特征有增强的趋势。例如:在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下,饱和度 0.70 和 0.78 试样的应力-应变曲线均呈现典型的软化特征,如图 2(a)和 2(b)所示;当温度降低至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,饱和度 0.78 试样的应力-应变曲线的软化特征显著减

弱,如图 2(c)所示;但当温度进一步降低至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,仅有饱和度 0.70 的试样呈现应变软化特征,而饱和度 0.78 试样的应力-应变关系曲线则转变为应变硬化型,如图 2(d)所示。也就是说,温度的降低有助于提升渠坡膨胀土试样的塑性,这与试样内部的含冰量以及冰的流变性密切相关。值得注意的是,对于饱和度 0.70 的试样, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的破坏应变仅为 5.8%, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的破坏应变分别为 12.1%和 13.7%,而 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的破坏应变达到 17.4%,说明温度降低有助于增加试样的韧性,提升试样抵抗变形破坏的能力<sup>[19]</sup>。

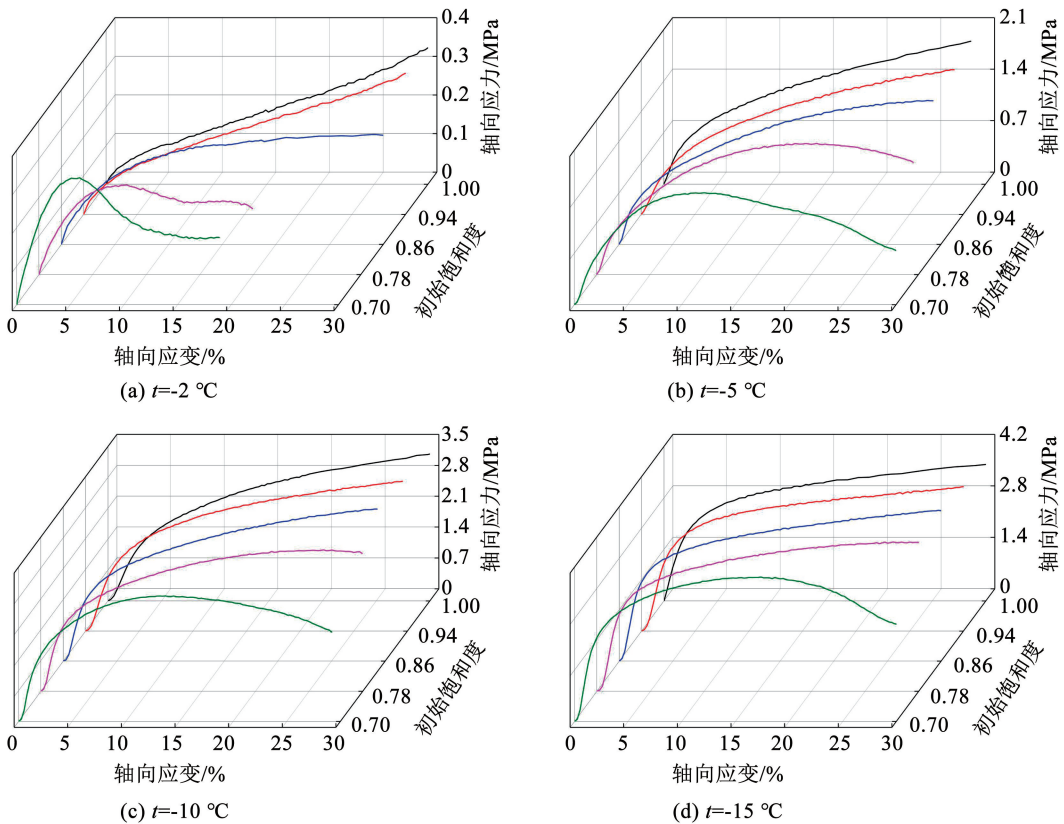


图 2 各温度下不同饱和度试样的应力-应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curves of samples with different initial saturation at different temperatures

### 2.1.2 应力-应变方程

通过以上对冻结膨胀土试样无侧限压缩试验应力-应变曲线分析可知,低饱和度试样(0.70、0.78)多为应变软化型应力-应变曲线,而高饱和度试样则更倾向于呈现出应变硬化型,因此本文将采用两种不同类型的应力-应变方程来描述冻结膨胀土的应力-应变关系。

首先,以饱和度 0.86 试样为代表的应变硬化型应力-应变关系曲线,采用双曲线方程进行描述:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为轴向应力; $\varepsilon$  为轴向应变; $a$  和  $b$  分别为拟

合参数。

而对于以饱和度 0.70 试样为代表的应变软化型应力-应变关系来说,借鉴赵坤等<sup>[20]</sup>在对水泥砂浆-泡沫混凝土接触面直剪试验研究中所提出的复合指数本构方程进行描述:

$$\sigma = (a\varepsilon^m - b) \exp(-c\varepsilon^n) + b \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为轴向应力; $\varepsilon$  为轴向应变; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $m$  和  $n$  分别为拟合参数。图 3 给出两种不同饱和度试样的试验值与拟合效果,相关拟合参数列于表 1 和表 2。可以发现,采用双曲线方程及复合指数本构方程对试样的应力-应变关系拟合均具有较高的相关系数,可收获较好的效果。

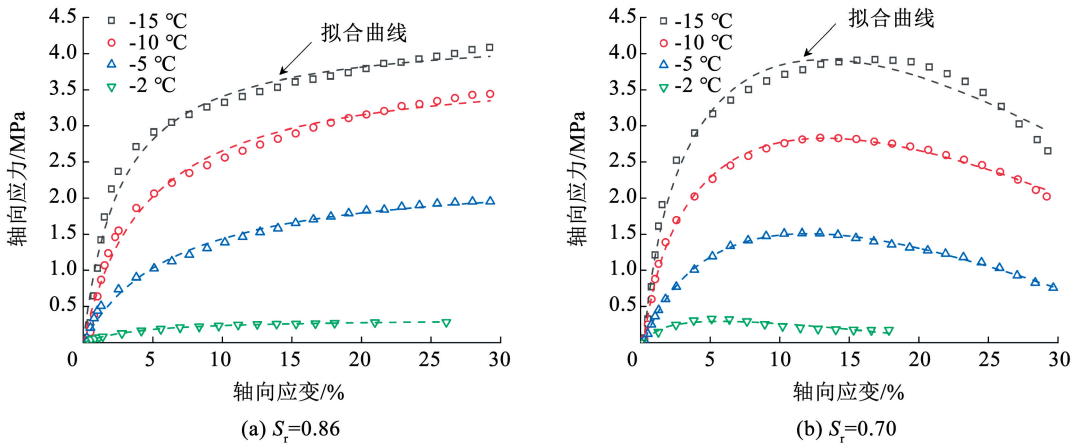


图 3 试样的试验值与拟合结果对比

Fig. 3 The comparison of the fitting results and test data of the sample

表 1 应变硬化型试样中双曲线方程拟合参数 ( $S_r = 0.86$ )

Tab.1 Hyperbolic equation fitting parameters in strain-hardening sample ( $S_r = 0.86$ )

$t/^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$R^2$
-15	0.62	0.23	0.985 7
-10	1.18	0.25	0.991 3
-5	2.75	0.41	0.993 7
-2	12.44	3.04	0.998 8

表 2 应变软化型试样中双曲线方程拟合参数 ( $S_r = 0.70$ )

Tab.2 Composite index equation fitting parameters in strain-softening sample ( $S_r = 0.70$ )

$t/^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$c$	$m$	$n$	$R^2$
-15	3.83	-14.13	0.16	0.71	0.59	0.987 0
-10	6.01	-13.35	0.31	0.61	0.43	0.997 4
-5	2.50	-10.53	0.18	0.70	0.55	0.998 8
-2	2.81	-5.89	0.36	0.45	0.34	0.944 3

## 2.2 破坏形态

### 2.2.1 -2 °C 工况

考虑到 -2 °C 试样的软化破坏特征相比较明显,

首先对 -2 °C 试样的破坏形态进行分析,图 4 给出了 -2 °C 工况下不同饱和度试样的典型破坏形态。可以看出,饱和度为 0.70 试样呈现出软化型脆性破坏特征,并且在弹性阶段和屈服阶段中,伴随轴向应变的增加,试样逐渐由“瘦高状”演变为“矮胖状”,当轴向应力达到峰值,试样中部开始鼓胀并伴随有短细裂隙,试样的承载能力逐渐减弱,进而进入软化破坏阶段,随着轴向应变的继续增大,微小裂隙逐渐贯穿并形成连通破坏面,试样表面土体开始破裂而脱落,呈现出垮塌破坏型式。这是因为 -2 °C 接近冻结温度,低饱和度的试样内部冻结形成的稀少冰颗粒不足以填满试样内部孔隙,导致试样内部的冰-土胶结力较弱,试样整体抗变形能力较差<sup>[19,21]</sup>。而饱和状态下,由于试样内部含冰量及未冻水含量较高,最终展现出硬化型塑性破坏特征,且在较大的轴向应变下,试样底部土体逐渐鼓胀并伴随有许多明显的裂纹,类似的破坏形态在 Chai 等<sup>[22]</sup>、操子明等<sup>[23]</sup>的研究中也有发现。

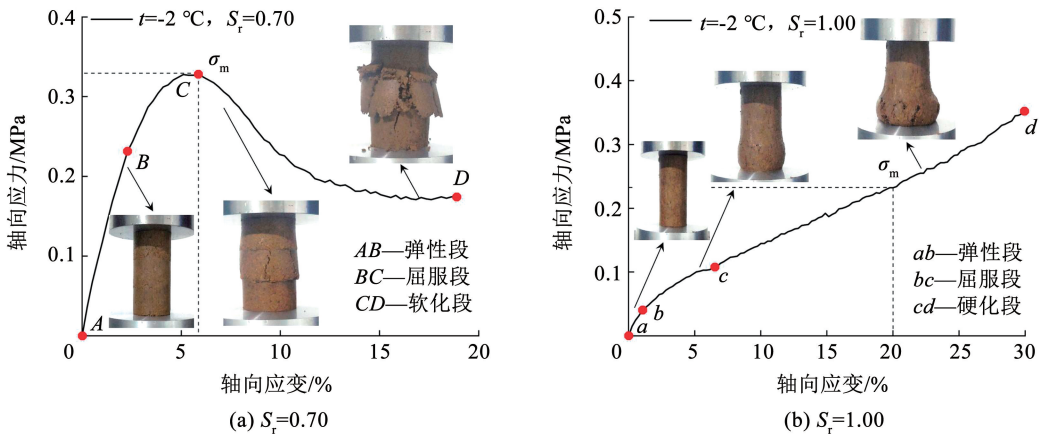
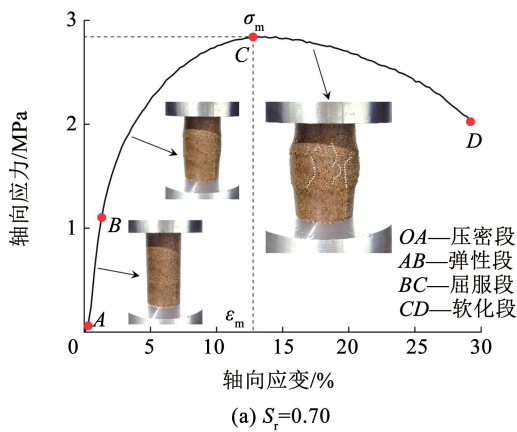


图 4 -2 °C 下试样典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of samples under -2 °C

2.2.2 -10 °C 工况

由于 -5、-10、-15 °C 下试样的破坏形态具有相似的破坏特征, 故选取 -10 °C 工况为例进行分析, 其不同饱和度试样的典型破坏形态如图 5 所示。与 -2 °C 试样破坏形态显著不同的是, -10 °C 试样破坏后可以较好地保留原先的圆柱体形态, 这是因为 -10 °C 工况下水的成冰能力较强, 试样内部大量的冰晶体将土颗粒“桥接”在一起, 从而提升试样的整体抗变形能力<sup>[19]</sup>。但值得注意的是, 饱和度 0.70



的试样虽然没有完全垮塌, 但破坏后的试样中部鼓起, 表面存在多处明显的竖向裂缝, 这与低含冰量冻土内部较脆弱的冰胶结力和试样端部变形受约束密切相关<sup>[18,24]</sup>。相反, 饱和试样冻结后, 试样内部充足的冰晶提供出较强的冰胶结强度, 试样表现出整体压缩且能够抵抗较大的变形, 导致其即使在 30% 轴向应变的大变形条件下也没有明显的形态变化, 仅仅是在试样表面呈落散布着些许微小裂隙, 其形成原因与饱和试样内部塑性冰的强流变性有关。

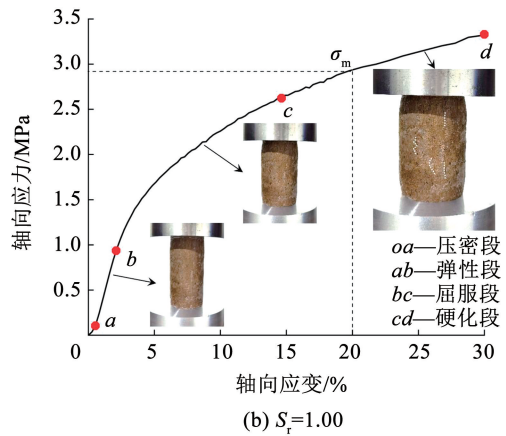


图 5 -10 °C 下试样典型破坏形态

Fig. 5 Typical failure modes of samples under -10 °C

此外, 以往关于冻土无侧限压缩试验的研究成果表明, 软化型应力 - 应变关系曲线整体可划分为孔隙压密段、弹性变形段、应力屈服段和软化破坏段<sup>[25-26]</sup>, 而硬化型应力 - 应变曲线则包括孔隙压密段、弹性变形段、应力屈服段以及硬化段<sup>[27]</sup>, 上述分段方式也同样适用于本次试验中冻结膨胀土试样的破坏过程。值得注意的是, 无论试样呈现为软化型还是硬化型破坏特征, -2 °C 下试样的破坏过程中无法捕获到初始孔隙压密段, 即初始加载过程中应力随应变增加而相对缓慢增长的阶段, 但其他试验温度下皆可清晰地看到试验初期存在的孔隙压密段, 如图 2 和图 5 所示。这是因为本次试验中试样的干密度控制为膨胀土最大干密度 (1.6 g/cm<sup>3</sup>), 其内部初始孔隙较少, 且在 -2 °C 下受冻胀变形的影响相对较弱, 所以 -2 °C 下的试样中紧密接触的冻土颗粒在加载初期被快速调动共同抵抗变形破坏, 轴向应力快速增大。相反, 冻结温度较低时, 试样内部的自由水凝结成冰撑大了土颗粒之间的孔隙结构, 且试样原先相对平坦的端部会因不均匀冻胀变形呈现为抛物线型 (图 6), 所以在压缩初期, 不仅试样端部与加载机的接触面积相对较小, 抗变形能力较弱, 且土颗粒之间的孔隙相对较大, 因此在较小的轴向应力下就会产生相对较大的轴向应变, 直至土体颗粒之间紧密接触共同抵抗压缩变形。

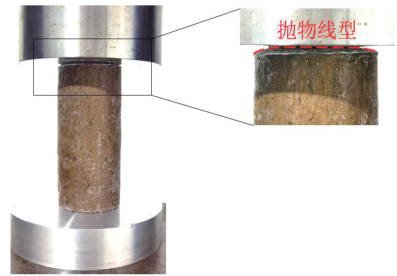


图 6 较低冻结温度下试样端部形态

Fig. 6 The end morphology of the sample at low freezing temperature

2.3 抗压强度

2.3.1 饱和度的影响

本研究中, 对于应变软化型曲线而言, 选取峰值轴向应力作为试样的抗压强度, 而硬化型曲线则选取 20% 轴向应变对应的应力作为抗压强度<sup>[18,28]</sup>。图 7 给出不同温度工况下试样的抗压强度与初始饱和度之间的关系。可以直观地发现, 试样抗压强度随饱和度增加的变化规律展现出显著的温度依赖性。具体来说, 伴随试样初始饱和度的增加, -15 °C 下试样抗压强度明显不断弱化, 而 -10 °C 与 -5 °C 下试样抗压强度则呈现出先增大后减小的变化规律, 存在一个“临界饱和度”使其抗压性能最优, 类似的试验规律在张雅琴等<sup>[18]</sup>、操子明等<sup>[23]</sup>、孙立强等<sup>[28]</sup>在相同试验温度下对不同含水率试样的无侧

限压缩试验中均有发现。但考虑到冻结温度对冻土试样内部冰含量的重要影响,所以有必要在温度和饱和度的耦合作用下探究试样抗压强度的变化规律。通过对  $-15$ 、 $-10$ 、 $5$   $^{\circ}\text{C}$  下试样抗压强度与初始饱和度之间关系的综合分析,  $-15$   $^{\circ}\text{C}$  下试样也应该存在一个“临界饱和度”使得其抗压性能最优,并且可以推测该饱和度  $\leq 0.70$ 。那么,冻结试样的“临界饱和度”呈现出随试验温度降低而减小的趋势。这是因为在一定的冻结温度下,在试样不断达到饱和状态的过程中,试样内部可冻结生成的冰晶数量不断增加,只有当土体孔隙达到冰晶饱和状态时,试

样的抗压性能最优,而随着饱和度继续增大,过剩的冰晶或未冻水反而会削弱试样的抗压能力,导致试样的抗压强度开始衰减<sup>[18,28]</sup>。而本次试验中试样采用的干密度为膨胀土的最大干密度,土体内部可容纳冰颗粒的孔隙较少,在较低的冻结温度下,水的成冰能力增强,试样内部孔隙达到冰晶饱和状态所需要的水分减少,因此其“临界饱和度”随温度降低而减小。此外,由于  $-2$   $^{\circ}\text{C}$  接近于冻结温度,试样的性质与融土相似,试样的抗压强度与  $-5$   $^{\circ}\text{C}$ 、 $-10$   $^{\circ}\text{C}$  与  $-15$   $^{\circ}\text{C}$  下相比显著降低,并且可基本认为其随饱和度的增加而不断减小。

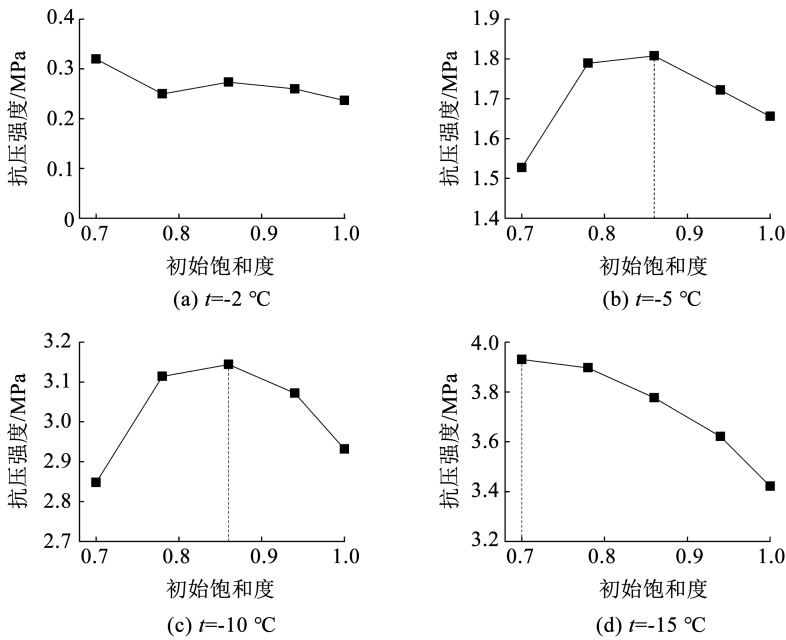


图 7 不同温度工况下试样抗压强度与初始饱和度的关系

Fig. 7 The relationship between initial saturation and compressive strength of samples under different temperatures

### 2.3.2 温度的影响

图 8 给出试样抗压强度与温度的关系,可以看出,不同饱和度试样的抗压强度随温度的降低呈现出衰减式增大的规律。这是因为温度的降低,将导致试样内部含冰量增加、冰颗粒强度增大,最终表现为试样的抗压强度随温度降低而增大,但抗压强度的增长速率却随着温度的降低而减小,尤其在  $-2 \sim -5$   $^{\circ}\text{C}$  时,抗压强度的增速最快。这可解释如下:  $-2$   $^{\circ}\text{C}$  接近于土体的冻结温度,土体性质与融土相似,而当温度降低到  $-5$   $^{\circ}\text{C}$  时,试样内部骤现的冰晶引起试样的抗压强度出现一个质的提升。但伴随温度的继续降低,冻结试样内部未冻水含量和含冰量逐渐趋于稳定,同时冰晶强度增速也变缓,最终导致冻土试样的抗压强度增速在  $-5 \sim -10$   $^{\circ}\text{C}$  时和  $-10 \sim -15$   $^{\circ}\text{C}$  时逐渐减小<sup>[24,26]</sup>。

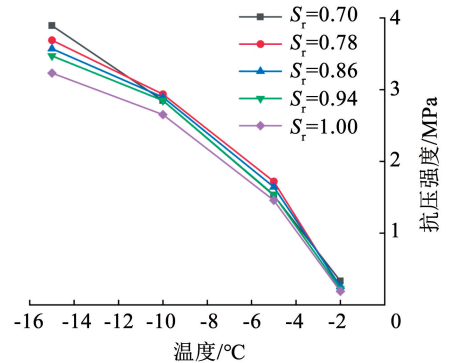


图 8 不同饱和度工况下试样抗压强度与温度的关系

Fig. 8 The relationship between temperature and compressive strength of samples under different saturation conditions

### 2.4 弹性模量与硬化模量

参考 Zhao 等<sup>[27]</sup>的分析方式,将冻结膨胀土试样应力-应变曲线中弹性变形阶段的斜率定义为试

样的弹性模量  $E_e$ , 而对于呈现应变硬化型曲线的试样而言 ( $S_r = 0.86, 0.94, 1.00$ ), 将其硬化阶段的斜率定义为试样的硬化模量  $E_h$ 。图 9(a) 给出试样的弹性模量与饱和度和温度之间的关系。可以直观发现, 试样的弹性模量呈现出随试验温度降低而增加, 但随试样饱和度增加而降低的变化规律。这是因为在一定温度下, 受成冰能力的制约, 试样内部未冻水含量随试样初始饱和度的升高而增加, 导致覆盖在颗粒表面的水膜变厚, 使得颗粒之间相互运动的阻力减小, 胶结力减弱, 最终造成单位应变增加所需的应力减小, 即弹性模量随土体初始饱和度的增加而降低。然而伴随温度的降低, 试样内部冻结生成更多的冰晶, 冰晶强度和冰-土胶结力也相应增强, 试样整体抗变形能力增大, 弹性模量随之提升。通过回归分析, 可以用式(3)所代表的空间平面描述试样弹性模量与温度和初始饱和度之间的关系。

$$E_e = 5.39tS_r - 10.02S_r - 11.74t + 1.24, R^2 = 0.9899 \quad (3)$$

式中:  $E_e$  为试样的弹性模量;  $t$  为试验温度;  $S_r$  为土体初始饱和度。

图 9(b) 给出试样的硬化模量与初始饱和度和温度之间的关系。通过与图 9(a) 对比, 试样的硬化模量相较弹性模量而言弱化许多, 意味着伴随试验的进行, 试样在硬化阶段中拥有相对微弱的抗变形破坏能力。此外, 试样的硬化模量几乎不受饱和度变化的影响, 但不同饱和度下试样的硬化模量均随冻结温度的降低而先增加后减小, 在  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  下达到峰值, 说明在本次研究中,  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  下试样拥有最强的抗变形持续能力, 这是由于在过低的温度下 ( $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ), 试样内部过剩的冰颗粒在压缩过程中破坏了土体原有骨架所致<sup>[28]</sup>。

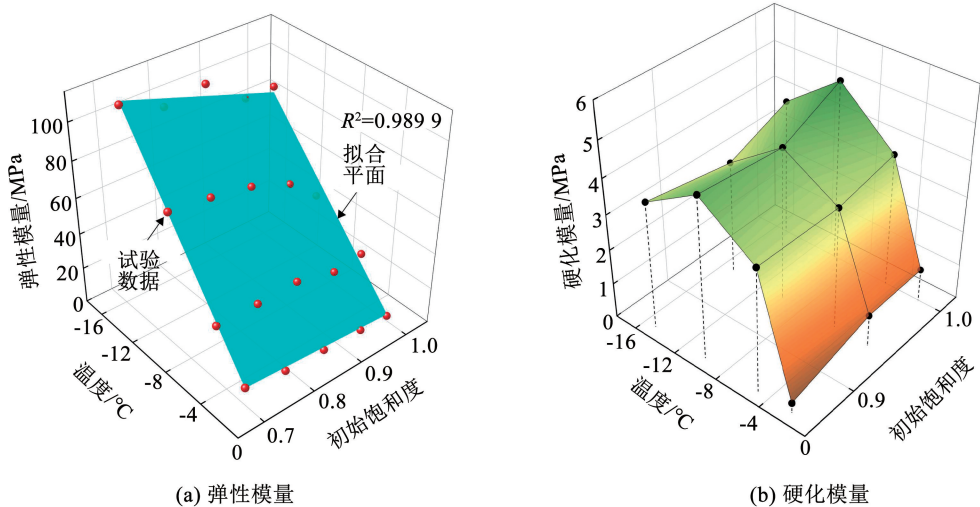


图 9 不同试验工况下试样的模量

Fig. 9 The modulus of samples under different test conditions

### 3 结 论

本文以南水北调中线工程叶县段渠坡膨胀土为研究对象, 开展了一系列不同饱和度下渠坡膨胀土的低温无侧限抗压强度试验, 研究了饱和度和温度对渠坡膨胀土强度变形特性的影响, 得到如下主要结论:

1) 随着土体饱和度增加及试验温度降低, 试样的破坏模式逐渐由软化型脆性破坏过渡到硬化型塑性破坏, 可分别采用双曲线方程和复合指数本构方程较好地描述冻结膨胀土试样的硬化型和软化型应力-应变关系。

2) 不同饱和度冻结膨胀土试样的破坏形态在不同试验温度下差异明显。  $-2\text{ }^\circ\text{C}$  下, 低饱和度试

样呈现垮塌型破坏形态, 而饱和试样破坏后底部向外鼓胀;  $-5$ 、 $-10$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}$  下, 受冻胀变形不均匀的影响, 试样加载初期存在明显的孔隙压密过程, 且低饱和度试样以中部鼓胀破坏为主, 而饱和试样受压后形态保持相较完整。

3) 试样的抗压强度随温度降低呈现出衰减式增大的规律, 但与饱和度的关系却具有显著的温度依赖性,  $-2\text{ }^\circ\text{C}$  试样的抗压强度随饱和度增大而减小, 但  $-5$ 、 $-10$ 、 $-15\text{ }^\circ\text{C}$  下试样的抗压强度展现出先增大后减小变化规律, 存在一个随冻结温度降低而减小的“临界饱和度”, 使其抗压性能最优。

4) 试样的弹性模量随着试验温度降低和饱和度的减小而增大, 三者之间的关系可用一个空间平面方程来表述; 试样的硬化模量随着试验温度的降

低先增加后减小,在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下达到峰值,且几乎不受饱和度的影响。

## 参考文献

- [1] 周跃峰,程展林,龚壁卫,等. 新疆某渠道边坡填料的剪胀特性与变形失稳研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊2): 4406  
ZHOU Yuefeng, CHENG Zhanlin, GONG Biwei, et al. The dilatancy and instability of an infilled material in a channel slope in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup. 2): 4406. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0339
- [2] 张思钰,张勇敢,刘斯宏,等. 膨胀土巴西劈裂强度及其破坏能量演化规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(11): 125  
ZHANG Siyu, ZHANG Yonggan, LIU Sihong, et al. Evolution of Brazilian splitting tensile strength and its associated fracture energy in expansive soil[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(11): 125. DOI: 10.11918/202303043
- [3] 何鹏飞,马巍. 我国寒区输水工程研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 182  
HE Pengfei, MA Wei. Study of canals in cold regions of China: achievements and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 182. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0026
- [4] CHEN Y, HUANG Y H, CAI Z Y, et al. Failure mechanism and treatment measures for expansive soil canals in cold regions: a case study of the Xinjiang Water Conveyance Canal in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 216: 103991. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103991
- [5] 徐丽丽,刘丽佳,徐昭巍,等. 季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 216  
XU Lili, LIU Lijia, XU Zhaowei, et al. Integrated protection technology for expansive soil slopes in seasonally frozen zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup. 1): 216. DOI: 10.11779/CJGE2016S1040
- [6] 李新宇,凌贤长,曲娜. 考虑温度效应的冻结膨胀土统计损伤模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(8): 2339  
LI Xinyu, LING Xianzhang, QU Na. Statistical damage model of frozen expansive soil considering temperature effect[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(8): 2339. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgbx.20211151
- [7] 张勇敢,鲁洋,刘斯宏,等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2046  
ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2046. DOI: 10.11779/CJGE202111011
- [8] LU Y, LIU S H. Cracking in an expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 9(4): 392. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2017.00392
- [9] 罗晓倩,孔令伟,鄢俊彪,等. 不同饱和度下膨胀土原位孔内剪切试验及强度响应特征[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 153  
LUO Xiaoqian, KONG Lingwei, YAN Junbiao, et al. In-situ borehole shear test and shear strength response characteristics of expansive soil under different saturations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 153. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0141
- [10] 连继峰,罗强,张文生,等. 路堤边坡膨胀土强度非线性应力阈值与浅层稳定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3): 142  
LIAN Jifeng, LUO Qiang, ZHANG Wensheng, et al. Nonlinear stress threshold for expansive soil strength and shallow stability of embankment slope[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(3): 142. DOI: 10.11918/201908149
- [11] 牛庚,朱晓凤,李俊星,等. 宽广吸力范围非饱和土剪切强度试验研究及其预测[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3349  
NIU Geng, ZHU Xiaofeng, LI Junxing, et al. Experimental study on shear strength of unsaturated soil over a wide suction range and its prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3349. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.2005
- [12] 丁小刚,马丽娜,简文博,等. 非饱和重塑弱膨胀土孔隙结构与土-水特征曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 3081  
DING Xiaogang, MA Lina, LIAN Wenbo, et al. Experimental study on the pore structure and soil-water characteristic curve of unsaturated remolded weak expansive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup. 1): 3081. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0277
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for geotechnical test methods; GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for buildings in expansive soil regions; GB 50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013
- [15] 王亮亮,王照腾,方薇,等. 气候边缘地带膨胀土强度特性随冻融循环劣化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 288  
WANG Liangliang, WANG Zhaoteng, FANG Wei, et al. Deteriorating law of strength properties of expansive soil in climate marginal zone with freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 288. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.023
- [16] 王流泉,赵文清,姚丽华. 南水北调中线工程渠道防冻胀设计中的几个问题[J]. 南水北调与水利科技, 2004(5): 9  
WANG Liuquan, ZHAO Wenqing, YAO Lihua. Several problems on design against freezing damage of the channel in south-to-north water transfer [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004(5): 9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2004.05.004
- [17] LAI Y M, LIAO M K, HU K. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory [J]. International Journal of Plasticity, 2016(78): 84. DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.10.008
- [18] 张雅琴,杨平,江汪洋,等. 含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 79  
ZHANG Yaqin, YANG Ping, JIANG Wangyang, et al. Effect of water content and strain rate on the strength characteristics of frozen silty clay [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(3): 79. DOI: 10.13705/j.issn.1671-

6833.2020.02.006

- [19] XU X T, WANG Y B, YIN Z H, et al. Effect of temperature and strain rate on mechanical characteristics and constitutive model of frozen Helin loess [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 136: 44. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.01.010
- [20] 赵坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 地下工程衬砌与减震层接触面力学特性直剪试验及数值仿真[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2662  
ZHAO Kun, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng, et al. Direct shear test and numerical simulation for mechanical characteristics of the contact surface between the lining and shock absorption layer in underground engineering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2662. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2286
- [21] 张勇敢, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 温度和砾石量对冻结砾石黏土单轴压缩特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2357  
ZHANG Yonggan, LU Yang, LIU Sihong, et al. Influence of temperature and gravel content on uniaxial compressive characteristics of frozen gravel-mixed clays [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2357. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0420
- [22] CHAI M T, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effect of cement additives on unconfined compressive strength of warm and ice-rich frozen soil [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 149: 861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.202
- [23] 操子明, 马芹永. 含水率对冻结膨胀土单轴抗压强度影响的试验与分析 [J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(4): 19  
CAO Ziming, MA Qinyong. Experiment and analysis of influence of water content on uniaxial compressive strength of frozen expansive soil [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 38(4): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2018.04.004
- [24] 汪恩良, 任志凤, 韩红卫, 等. 超低温冻结黏土单轴抗压力学性质试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1851  
WANG Enliang, REN Zhifeng, HAN Hongwei, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of ultra-low temperature frozen clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1851. DOI: 10.11779/CJGE202110011
- [25] YANG Y H, WEI Z A, YIN G Z, et al. Uniaxial compression test of frozen tailings [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 129: 60. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.007
- [26] LI Z Q, HU F, QI S W, et al. Strain-softening failure mode after the post-peak as a unique mechanism of ruptures in a frozen soil-rock mixture [J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: 105725. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105725
- [27] ZHAO X D, ZHOU G Q, WANG J Z. Deformation and strength behaviors of frozen clay with thermal gradient under uniaxial compression [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 550. DOI: 10.1016/j.tust.2013.09.003
- [28] 孙立强, 路江鑫, 李恒, 等. 含水率和含盐量对人工冻土强度特性影响的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊2): 27  
SUN Liqiang, LU Jiangxin, LI Heng, et al. Influence of water and salt contents on strength of artificially frozen soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup.2): 27. DOI: 10.11779/CJGE2015S2006

(上接第 122 页)

- [20] 马洪霞, 丛林虎. 基于改进非等间隔灰色预测模型的导弹退化状态预测 [J]. *计算机与现代化*, 2016(3): 5  
MA Hongxia, CONG Linhu. Prediction of missile degradation condition based on improved unequal interval grey model [J]. *Computer and Modernization*, 2016(3): 5
- [21] 周中, 张俊杰, 丁昊晖, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的隧道绿色建造污水处理预测模型 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(5): 1450  
ZHOU Zhong, ZHANG Junjie, DING Haohui, et al. Prediction model of sewage treatment in tunnel green construction based on PSO-BP neural network [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(5): 1450
- [22] DENG Yong, QIAO Ling, ZHU Jingchuan, et al. Mechanical performance and microstructure prediction of hypereutectoid rail steels based on BP neural networks [J]. *IEEE Access*, 2020(8): 41905
- [23] MASON K, DUGGAND J, HOWLEY E. Multi-objective dynamic economic emission dispatch using particle swarm optimisation variants [J]. *Neurocomputing*, 2017, 270: 188
- [24] 高雅, 时瑾, 焦彬洋, 等. 非均匀速度分布对地铁曲线区段钢轨磨损演变的影响 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(14): 41  
GAO Ya, SHI Jin, JIAO Binyang, et al. Influence of non-uniform passing speed distribution on rail wear evolution in the curved section of Metro [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(14): 41
- [25] 时瑾, 龙许友, 王英杰. 重载铁路桥上反向曲线地段列车运行引起的动力响应分析及参数设置研究 [J]. *铁道学报*, 2016, 38(3): 119  
SHI Jin, LONG Xuyou, WANG Yingjie. Research of curve parameters and analysis of dynamic response caused by train-bridge interaction on reverse curve section of heavy haul railway bridge [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(3): 119