

DOI: 10.11779/CJGE202110011

# 超低温冻结黏土单轴抗压力学性质试验研究

汪恩良, 任志凤, 韩红卫\*, 田雨, 胡胜博, 刘兴超

(东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 地下交通、煤炭开采等工程常遇砂土交错和地下水极为丰富的软弱地层施工难题, 可利用液氮使土体处在超低温冻结状态以达到土层稳定和加固的目的, 因此, 探究超低温冻土的抗压强度对于工程施工的长期稳定和安全具有重要意义。为揭示超低温冻结黏土单轴抗压力学性质变化规律, 对含水率为 17%, 20%, 23% 的土样进行  $-10^{\circ}\text{C}$  ~  $-180^{\circ}\text{C}$  的单轴压缩试验。结果表明: 冻土温度高于  $-80^{\circ}\text{C}$  时, 呈弹塑性破坏, 低于  $-80^{\circ}\text{C}$  时, 呈脆性破坏; 冻土抗压强度随温度降低, 先呈线性增加, 当温度低于  $-80^{\circ}\text{C}$  后强度基本稳定, 并对温度与冻土抗压强度进行拟合, 拟合效果较好; 含水率在 17%~23%, 冻土抗压强度随含水率增加而增大, 冻土弹性模量随温度降低呈上升趋势, 且含水率越高弹性模量越大。最后, 对比分析了 4 种应力-应变方程对超低温冻土关系的适用性, 发现幂函数和双曲线公式拟合超低温冻土应力-应变关系精度较低, 拟合效果并不理想; 复合幂指数模型对弹塑性破坏过程拟合精度较好, 并能准确地描述该过程的屈服和破坏情况, 但对于脆性破坏段的应力-应变曲线并不适应, 因此该模型有一定的局限性; 黏弹塑性方程对冻土应力-应变关系拟合精度最好, 后引入温度函数, 改进黏弹塑性方程, 提出与冻土温度有关的复合型方程, 该方程拟合精度更高, 补充了超低温冻土应力应变方程理论, 可以为实际工程提供理论参考。

**关键词:** 液氮; 超低温; 冻土; 抗压强度; 应力-应变关系

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)10-1851-10

**作者简介:** 汪恩良(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程冻土和水工建筑物冻害防治技术研究。E-mail: HLJWEL@126.com。

## Experimental study on uniaxial compressive strength of ultra-low temperature frozen clay

WANG En-liang, REN Zhi-feng, HAN Hong-wei, TIAN Yu, HU Sheng-bo, LIU Xing-chao

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Underground transportation, coal mining and other projects often encounter the construction problems of sandy soil crisscross and extremely rich groundwater in soft soil strata. Liquid nitrogen can be used to make the soil in the ultra-low temperature freezing state achieve the purpose of soil stability and reinforcement. Therefore, it is of great significance to explore the compressive strength of the ultra-low temperature frozen soil for the long-term stability and safety of engineering construction. In order to reveal the variation of uniaxial compressive properties of ultra-low temperature frozen clay, the uniaxial compression tests at  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $-180^{\circ}\text{C}$  are carried out on the soil samples with moisture contents of 17%, 20% and 23%. The results show that when the temperature of frozen soil is higher than  $-80^{\circ}\text{C}$ , elastic-plastic failure occurs. When the temperature is lower than  $-80^{\circ}\text{C}$ , shows brittle failure. As the temperature decreases, the compressive strength of frozen soil increases linearly first. When the temperature is lower than  $-80^{\circ}\text{C}$ , the strength is basically stable, and the temperature is fitted by the compressive strength of frozen soil, and the fitting effect is good. When the moisture content is 17%~23%, the compressive strength of frozen soil increases with the increase of water content, and the elastic modulus of frozen soil increases with the decrease of temperature. Finally, the applicability of four kinds of stress-strain equations to the relationship of the ultra-low temperature frozen soil is compared and analyzed. It is found that the accuracy of the power function and hyperbolic formula to fit the stress-strain relationship of the ultra-low temperature frozen soil is low, and the fitting effect is not ideal. The composite power exponent model has a good fitting accuracy for the elastic-plastic failure process, and can accurately describe the yield and failure of the process, but it is not suitable for the stress-strain curve of brittle failure section, so

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771070); “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0407301)

收稿日期: 2021-01-13

\*通信作者(E-mail: hanhongwei@neau.edu.cn)

the model has some limitations. The viscoelastic plastic equation has the best fitting accuracy for the stress-strain relationship of frozen soil. Then the temperature function is introduced to improve the viscoelastic plastic equation, and a composite equation related to the temperature of frozen soil is proposed. The fitting accuracy of the equation is higher, which improves the theory of stress-strain equation of the ultra-low temperature frozen soil, and can provide theoretical reference for practical projects.

**Key words:** liquid nitrogen; ultra-low temperature; frozen soil; compressive strength; stress-strain relationship

## 0 引言

随着经济的飞速发展,全世界对地下空间的不断开发,地铁等地下工程常遇到砂土交错、土壁塌方等软弱地层施工难题<sup>[1]</sup>。常规地层加固方法很难彻底防治水害、解决失控塌方等技术难题。由此,遇到一系列工程难题和生命财产损失事故,制约经济发展。地层冻结技术是冻结施工的一种新技术,在英、美、法、日、俄兴起较早<sup>[2-3]</sup>。在中国,地层冻结技术实际于20世纪70年代初开始广泛应用于土层稳定工程中<sup>[4-5]</sup>,并逐渐在城市地下交通工程<sup>[6]</sup>、煤炭矿山开采工程<sup>[7]</sup>和紧急事故处理工程<sup>[8]</sup>中发挥加固和稳定作用。与常规方法不同的是,地层冻结技术通过人工制冷使土壤均匀降温,将土壤内的水冻结成冰,从而形成冻土,可极大提高地层整体强度,保证施工安全。地层冻结制冷技术通常利用氨( $-33.4^{\circ}\text{C}$ )、干冰( $-78.5^{\circ}\text{C}$ )、液氮( $-195.8^{\circ}\text{C}$ )等进行冻结,液氮化学性质稳定,冻结速度比传统冻结方式可提高10倍,被广泛应用于地层冻结工程<sup>[9]</sup>。

随着前沿科学和新技术不断发展,工程材料与结构在超常规温度、速度、场强和恶劣天气等极端服役环境中的力学响应规律成为研究热点<sup>[10]</sup>。一般超低温是指 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下<sup>[11-12]</sup>,在冻土工程学中,研究冻土超低温强度特性主要为了掌握冻土地基及应急工程力学强度指标、破坏及变化规律,以保证构筑物的安全稳定。采用冻结法对土层进行冻结后,由于温度极低,原有结构发生破坏,会对地层土体产生强烈的冻结作用,改变岩土的物理力学性质。因此,探究冻土在超低温状态下的物理力学性质,尤其是超低温状态下冻土抗压强度的变化对于保证工程施工安全具有重要意义。

目前,国内外针对温度对冻土抗压强度的影响研究,主要集中在 $0^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$ 的力学强度、弹性模量以及应力应变关系等方面<sup>[13-21]</sup>,但针对超低温条件下冻土的力学性质的研究尚且不足。同时,对于温度与冻土抗压强度的影响关系式尚未达成一致的认识,付伟等<sup>[22]</sup>和姚兆明等<sup>[23]</sup>认为冻土单轴抗压强度随温度降低呈线性增加;陈士威等<sup>[24]</sup>和李怀鑫等<sup>[25]</sup>认为冻土抗压强度与温度的关系可用指数函数来表示。综上所述,

尽管就温度对土体力学性质的影响开展了一些研究,但超低温条件下土体的抗压强度研究认识不足,且由于温度区间较小,温度与土体抗压强度关系式未能达到共识,这些研究还不能满足超低温工况下,土层稳定工程建设的需要。经过多年的研究和发展,很多专家学者对于普通冻土做了大量的试验与理论研究<sup>[26-29]</sup>,冻结土体在低温冻结的条件下力学强度得到提高,土体内部由原本的三相复合体变为四相复合体,有别于常规土体的应力-应变关系方程,但传统冻土的应力-应变关系方程在超低温条件下是否适用有待研究。

本文在东北农业大学水利与土木工程学院低温环境模拟实验室对低液限黏土进行冻土单轴抗压强度试验,探求超低温条件下,土体抗压强度及应力-应变关系变化规律,对超低温冻土力学性质进行补充,完善冻土温度与抗压强度关系式,提出一个与冻土温度有关的复合型方程,为冻土力学的基本理论及工程实践提供理论依据与技术应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土样

本文试样所用土壤为低液限黏土,取自黑龙江省南部引嫩工程,为保证土体的均匀性,取样深度为2 m,将取回的土样进行风干、碾压、过2 mm筛备用,按照《土工试验方法标准》(GTB—50123—2019)进行物理性质试验测试,测得基本物理性质指标如表1所示。

### 1.2 试样制备与试验方法

冻土单轴抗压强度试验的试样直径为61.8 mm,高度为125 mm的圆柱形试件,采用轻型击实仪控制含水率和击实次数,制成干密度为 $1.70\text{ g/cm}^3$ ,含水率为17%,20%,23%的待测土样,共84个试样。

为防止液氮侵蚀,将试样用保鲜膜密封并冷冻,如图1(a)。为防止快速冷冻导致试样产生裂纹,将制备好的试样利用不同梯度降温策略控制试样温度(图1(b)),首先,采用常规冰柜将试样从常温降至 $-20^{\circ}\text{C}$ ;然后,采用低温冰柜将试样从 $-20^{\circ}\text{C}$ 降至 $-40^{\circ}\text{C}$ ;接着,采用超低温冰柜将试样从 $-40^{\circ}\text{C}$ 降至

表 1 试样的基本性质  
Table 1 Basic properties of soil samples

土壤类型	天然状态		相对质量密度 $G_s$	液限/%	塑限/%	塑性指数 $I_P$	颗粒级配/%		
	含水率/%	干密度 $\rho_d$					>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm
低液限黏土	17.67	1.71	2.73	36.5	17.5	19.0	35.50	35.00	29.50

-80℃；最后，采用液氮将试样从-80℃至-180℃。使用 WDW-100 低温电子万能试验机对不同温度的试样进行冻土单轴压缩试验，试验仪器如图 1（c），加载速率为 6 mm/min，试验时确保试样中心轴与荷载传感器轴线重合，设置试验方案和应力路径，进行压缩试验，直至试样破坏或者应变达到一定标准，停止试验，记录试验数据及试样破坏情况。试验过程设置两组平行样作为对照组，为减少试验误差，在不同温况下设置陪样，将温度传感器插入土样中心，连接巡检仪检测试样温度状况如图 1（d），同时在试验箱中放入液氮，用温度传感器监测箱体温度与试样温度一致，在快加载速率条件下加压破坏，确保试验数据有效可靠。

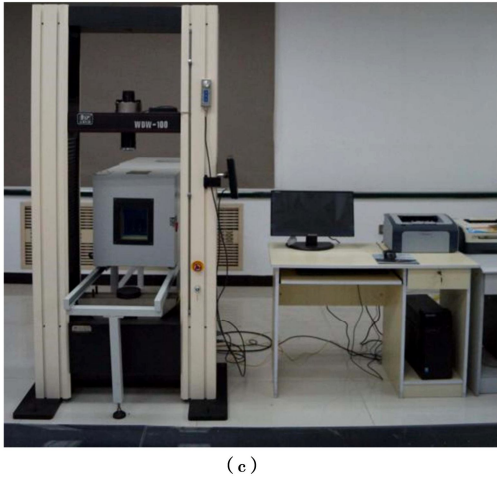


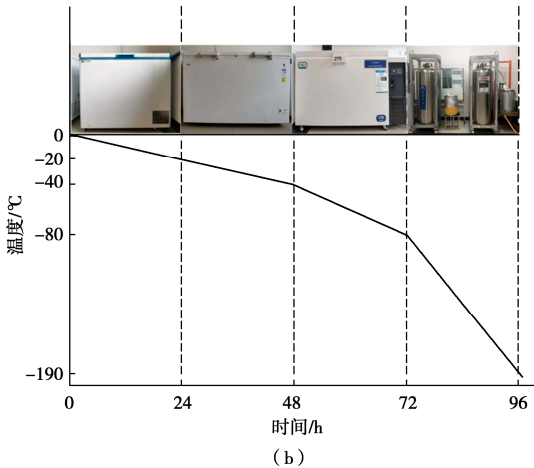
图 1 超低温冻土单轴压缩试验过程  
Fig. 1 Uniaxial compression test process of ultra-low temperature frozen soil

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

(1) 冻土的破坏情况

图 2 为不同温度下冻土的破坏情况，-10℃~-20℃的土样破坏时中部呈现明显的鼓胀形态，并伴随竖向裂纹，此种破坏形态与试样中孔隙水相态有关，试样承受荷载能力较弱，土体向较高应力状态处滑移，表面土体颗粒间胶结力不足以抵抗挤压，因此产生裂缝，同时受试验装置两端限制，两端变形有限，呈腰鼓形态破坏<sup>[30]</sup>；-30℃~-70℃时，随着土样温度降低，抵抗破坏的能力，主要来源于冰土胶结作用，土样变形不明显，随温度继续降低，一些胶结在一起的冰晶体被压碎，且端部受到土体的约束较小，两端开始产生细小裂纹；-80℃~-120℃，土样表面随温度降低裂



纹逐渐增加,微小裂隙逐渐延伸,形成贯穿裂缝; $-140^{\circ}\text{C}\sim-160^{\circ}\text{C}$ ,在荷载作用下,平行于加载轴的裂隙发生贯通,将试样分割成了条块状,破坏形式发展为多条裂缝断面,土样呈劈裂破坏;温度达到 $-180^{\circ}\text{C}$ 时,试样在荷载作用下易爆裂为碎块,破坏后试样产生碎屑较多,呈压碎破坏。

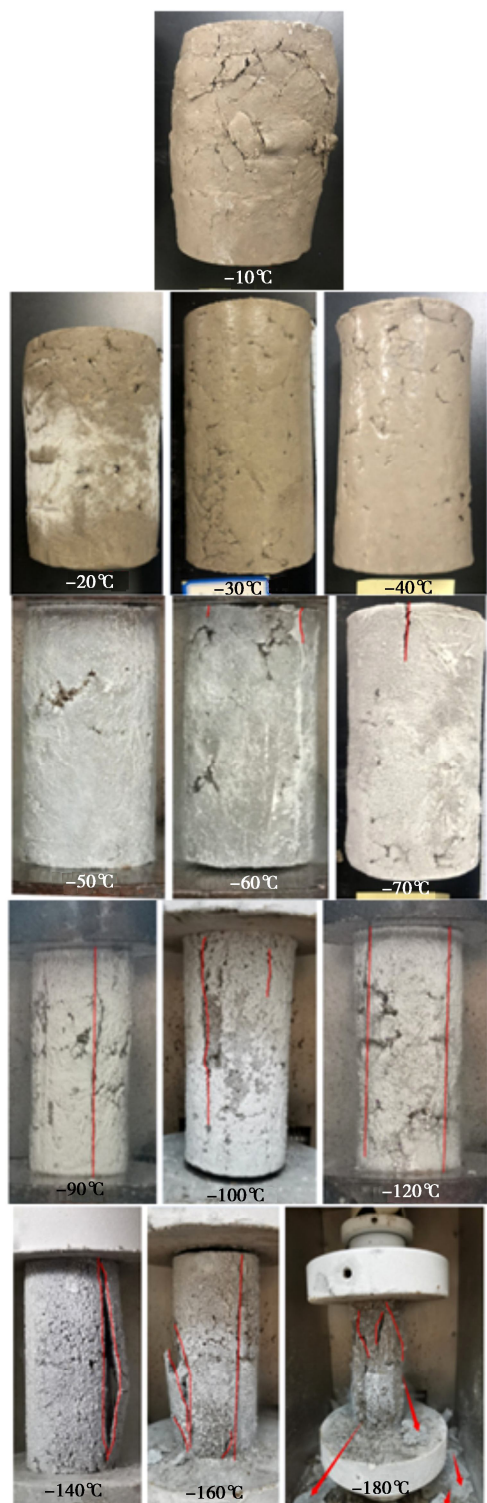


图2 不同温度冻土破坏形态

Fig. 2 Failure modes of frozen soil under different temperatures

## (2) 不同温度条件下冻土抗压强度关系

将含水率为17%, 19%, 21%的待测土样经不同降温策略进行降温处理后进行冻土单轴抗压强度试验,将不同温度下最大轴向应力作为抗压强度绘制如图3。试验结果表明:土温高于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时,冻土的抗压强度随土温降低而增大,抗压强度与土温的绝对值成正比,而在土温低于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时,抗压强度增长趋势变缓。一方面,未冻土转化为冻土时,液态水在负温环境中相变成固态冰<sup>[31]</sup>,导致了土体强度随温度而变。一般毛细水的冰点低于 $0^{\circ}\text{C}$ ,弱结合水在 $-20^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$ 才完全冻结,强结合水在 $-78^{\circ}\text{C}$ 仍不冻结<sup>[32]</sup>。资料表明<sup>[32]</sup>土体在过了剧烈相变区(大约为 $-10^{\circ}\text{C}$ )后,存在于大孔隙和毛细管中所有的自由水已经冻结,部分弱结合水也已经冻结。随温度降低,土中冰晶增加,在冻土中形成冰胶结物,而冰胶结物内聚力在土冻结的情况下产生并依赖于温度,冰的强度随温度降低而增加,冰-壤胶结面强度增大;另一方面,受冰晶体结构的影响,即氢离子活动性降低,冰更加坚硬密实。随着温度的逐渐降低,土体中的未冻水含量趋于平稳,温度降低变化为 $1^{\circ}\text{C}$ ,冰内水的相变不会超过0.1%,此段的未冻水主要是土颗粒表面的薄膜水,薄膜水随着温度的降低逐渐变薄,越薄越不易冻结,所以未冻水含量逐渐趋于平稳,接近完全冻结,冰由六方晶体变为立方晶体<sup>[33]</sup>,冰强度达到极限,冰-壤的抗压强度变化不明显。

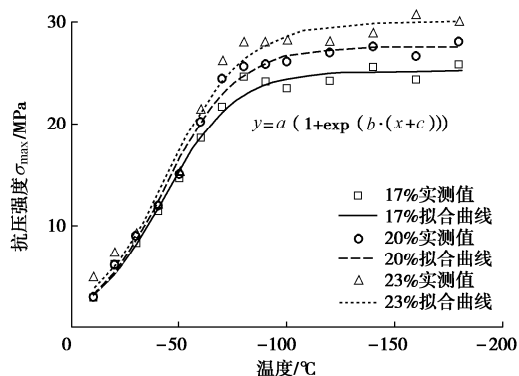


图3 不同温度和含水率冻土抗压强度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of compressive strength at different temperatures and moisture contents

土中的含水率会直接影响冻土强度的大小<sup>[34]</sup>。如图4所示,冻结强度受土体含水率的影响,在一定范围内,含水率越高,含冰量越多,冰-壤胶结力增强,抵抗荷载的能力提升,土体的抗压强度越大。对不同含水率的抗压强度曲线进行拟合:

$$y = a / (1 + \exp(b \cdot (x + c))) \quad (1)$$

式中, $y$ 为抗压强度, $x$ 为土体负温,将式中各参数如



表 2 所示。结果可知, 冻土抗压强度和负温的拟合程度较高, 相关性较好, 能够很好的描述温度变化下不同含水率抗压强度变化规律。

表 2 抗压强度与负温拟合曲线参数  
Table 2 Parametric solutions of fitting curve between compressive strength and negative temperature

含水率/%	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
17	25.25	0.061	42.18	0.9903
21	27.59	0.061	43.26	0.9924
23	30.04	0.056	44.05	0.9845

(3) 冻土的弹性模量

屈服应力极限与相应的应变之比定义为弹性模量, 冻土的弹性模量通常取极限轴向应力的 1/2 与其对应的应变的比值<sup>[25]</sup>, 即

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_{1/2}} \quad , \quad (2)$$

式中, *E* 为冻土弹性模量 (MPa),  $\sigma$  为抗压强度 (MPa),  $\varepsilon_{1/2}$  为极限轴向应力的一半对应的应变值。图 5 为不同含水率冻土降温过程的弹性模量。试验结果表明, 弹性模量虽然有些上下起伏, 但总体趋势随温度降低, 弹性模量呈上升趋势。由图 3 可知, 以-80℃为分界点, 低于-80℃时, 土体的抗压强度变化不再明显增加, 而弹性模量并没有明显受温度影响, 还是持续上升, 说明低于-80℃时随温度降低, 虽然试样的抗压强度不再变化, 但屈服点提前, 弹性模量继续增加; 且试样的含水率越大, 弹性模量越大。

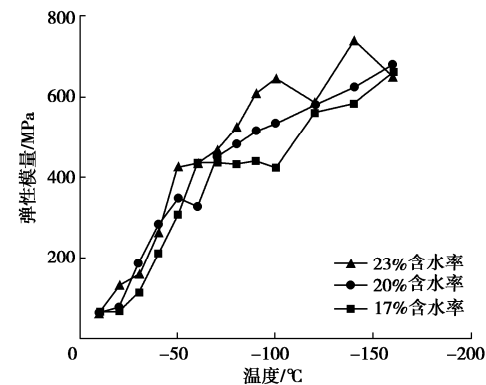


图 4 不同含水率降温过程弹性模量变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of elastic modulus in cooling process under different water contents

2.2 超低温冻土的应力 - 应变关系曲线及方程

(1) 冻土应力 - 应变关系曲线

将不同温度条件下, 17%含水率的低液限黏土的应力 - 应变关系曲线绘制如图 5, 从图 5 中可以看出, 温度对土体力学性质的影响十分显著<sup>[34]</sup>。土温在-10℃时, 随着土温逐渐降低, 冻土中的含冰量迅速增大, 存在于大孔隙和毛细管中的自由水已经冻结, 应力 - 应变关系为黏弹塑类型, 无明显的弹性屈服点, 即应力 - 应变关系曲线呈应变硬化 - 软化<sup>[33]</sup>。土温为

-20℃~-80℃时, 这时弱结合水已冻结, 对冻结强度起主导作用的为冰中氢离子活动性这一因素, 应力 - 应变关系为弹塑性类型, 有明显的弹性屈服点和峰值强度, 应力 - 应变关系曲线呈弹性 - 硬化 - 软化。土温低于-80℃时, 土中强结合水基本冻结, 未冻水含量极低, 应力 - 应变曲线开始呈线性上升, 荷载达到峰值后发生瞬间破坏, 土样经历了微裂隙的萌生发展与贯通过程, 应力 - 应变关系曲线呈明显的脆性破坏。

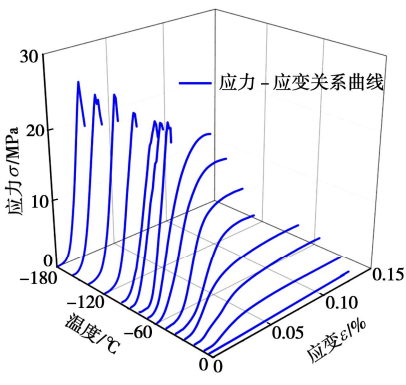


图 5 不同温度下冻土的应力 - 应变关系曲线  
Fig. 5 Relation curves between stress and strain of frozen soil under different temperatures

(2) 冻土应力 - 应变关系方程

由以上应力 - 应变关系曲线可见, 不同情况下, 应力 - 应变关系曲线有很大差别, 很难用同一类型的应力 - 应变方程来描述所有类型的应力 - 应变形式。

a) Vialov 提出了幂函数形式应力 - 应变关系<sup>[26]</sup>:

$$\sigma = A\varepsilon^m \quad . \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为应力,  $\varepsilon$  为应变, *A* 和 *m* 为参数。这种简单幂函数形式一直被广泛应用于描述冻土的应力 - 应变性状。对-30℃、-60℃、-80℃、-120℃、-180℃冻结温度下典型应力 - 应变关系曲线计算求解, 求解参数如表 3。

表 3 简单幂函数参数解 Table 3 Parametric solutions of simple power function			
温度/°C	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
-30	30.54	0.510	0.86430
-60	231.79	0.840	0.91558
-80	1.9478	2.092	0.94367
-120	75889.56	2.300	0.96976
-180	21943.28	1.910	0.92273

将计算结果和试验测得的应力 - 应变关系曲线进行对比, 如图 6 所示。

由图 6 可见, 通过简单幂函数计算出来的应力 - 应变关系曲线与试验值有明显差异, 且温度越高相关性越差, 不能够描述出应力 - 应变曲线的峰值及屈服阶段, 超低温冻土应力 - 应变关系并非服从幂函数定律。

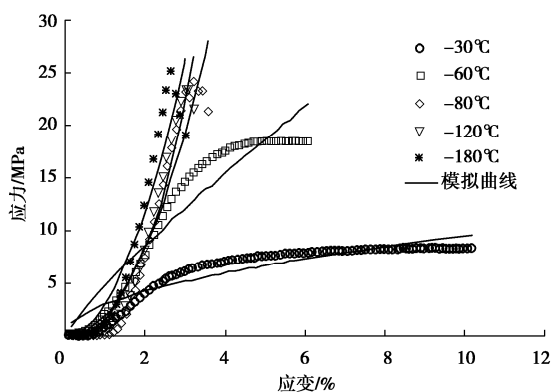


图6 简单幂函数试验值和计算值对比

Fig. 6 Comparison of experimental and calculated values of simple power function

b) 考特纳 (Kondner) 建议采用双曲线公式<sup>[27]</sup>描述 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 试验曲线, 即当 $\sigma_3$ 为常数时:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (4)$$

本试验为无侧限单轴抗压强度试验, 没有围压作用, 即 $\sigma_3$ 恒为0, 将式(4)改写成:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (5)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为参数, 所得直线在 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 坐标轴上的截距就是 $a$ , 所得直线的斜率为 $b$ 。

对 $-30^\circ\text{C}$ 、 $-60^\circ\text{C}$ 、 $-80^\circ\text{C}$ 、 $-120^\circ\text{C}$ 、 $-180^\circ\text{C}$ 冻结温度下典型应力-应变关系曲线计算求解, 求解参数如表4。

表4 双曲线公式参数解

Table 4 Parametric solutions of hyperbolic equation

温度/ $^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$m$	$n$	$k$	$R^2$
-30	0.074	0.002	-0.07	-1.66	0.002	0.9996
-60	-286	1343	1.809	1.749	0.184	0.9997
-80	0.0372	0.01796	3.3526	2.912	-2.048	0.9992
-120	3139	2369	4.305	5.669	-11.1	0.9991
-180	6222	57.88	-37.6	-0.26	0.007	0.9857

将计算结果和试验测得的应力-应变关系曲线进行对比, 如图7所示。

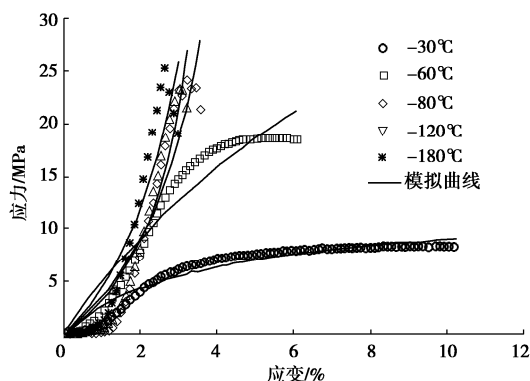


图7 双曲线方程试验值和计算值对比

Fig. 7 Comparison of experimental and calculated values of hyperbolic equation

由图7可见, 通过双曲线计算出来的应力-应变关系曲线相关性比幂函数要好, 但在 $-180^\circ\text{C}$ 时 $R^2$ 值较低, 同样不能够描述出应力-应变曲线的峰值及屈服阶段, 幂函数和双曲线方程都是建立在增量广义胡克定律基础上变模量的弹性模型, 无法反映土的剪胀性。

c) 王丽琴等<sup>[28]</sup>通过试验求解与验证, 发现复合幂指数非线性模型可以很好的描述各种类型土体的应力-应变曲线, 且计算准确度较传统非线性模型进一步提高, 下面对超低温冻土应力-应变关系是否适用进行验证。王丽琴等<sup>[28]</sup>提出函数表达式为

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \left[ (a\varepsilon_1^m - k)e^{-b\varepsilon_1^n} + k \right] p_a \quad (6)$$

式中,  $q$  为偏应力 (MPa),  $p_a$  为标准大气压 ( $p_a = 101.3 \text{ kPa}$ ),  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $k$  均为试验参数。本试验为无侧向单轴抗压强度试验, 没有围压的作用, 即 $\sigma_3$ 恒为0。对 $-30^\circ\text{C}$ 、 $-60^\circ\text{C}$ 、 $-80^\circ\text{C}$ 、 $-120^\circ\text{C}$ 、 $-180^\circ\text{C}$ 冻结温度下典型应力-应变关系曲线计算求解, 求解参数如表5。

表5 复合幂指数模型参数解

Table 5 Parametric solutions of composite power exponential model

温度/ $^\circ\text{C}$	$a$	$b$	$R^2$
-30	0.0031	0.0807	0.94097
-60	0.0018	0.0166	0.94052
-80	0.3438	-0.0603	0.91577
-120	0.0037	-0.0811	0.94251
-180	0.0026	-0.0500	0.89904

将计算结果和试验测得的应力-应变关系曲线进行对比, 如图8所示。

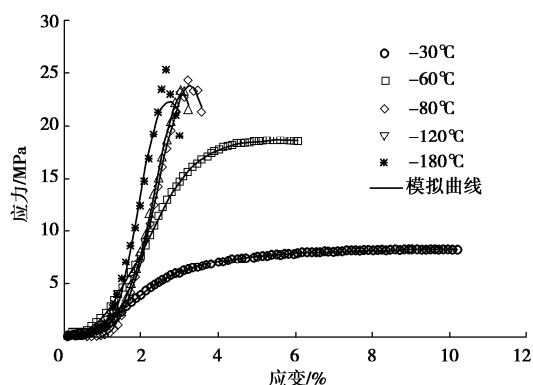


图8 复合幂指数模型试验值和计算值对比

Fig. 8 Comparison of experimental and calculated values of composite power exponent model

由拟合曲线与试验曲线对比图可以看出, 在超低温条件下, 复合幂指数模型不仅可以很好的描述单轴抗压应力-应变关系, 还可以计算出单轴抗压强度极限值, 但在 $-120^\circ\text{C}$ 及 $-180^\circ\text{C}$ 应力-应变关系的峰值拟合精度较低, 图8所示, 复合幂函数模型能够很好的

描述冻土弹塑性破坏过程, 对于超低温度的脆性破坏过程拟合精度偏低, 复合幂指数对于破坏段的应力-应变曲线并不适应, 只能反应试验破坏前冻结温度与应力-应变之间的非线性关系, 模型仍有一定的局限性。

d) 朱元林等<sup>[29]</sup>根据大量的冻土单轴压缩试验资料, 提出可将冻土的应力应变性状分为 9 类, 利用冻土黏弹塑性 I 型 (VEP-I) 针对超低温条件下的冻结土体进行拟合可用下式描述:

$$\sigma / \sigma_{\max} = (\varepsilon / \varepsilon_f)^n \exp[n(1 - \varepsilon / \varepsilon_f)] \quad , \quad (7)$$

式中,  $\sigma$  为应力,  $\sigma_{\max}$  为峰值强度,  $\varepsilon$  为应变,  $\varepsilon_f$  为破坏应变,  $n$  为参数。

为检验黏弹塑性方程对于超低温冻土应力-应变关系曲线的适用性, 对-30℃、-60℃、-80℃、-120℃、-180℃冻结温度下典型应力-应变关系曲线计算求解, 求解参数如表 6。

表 6 黏弹塑性方程参数解

Table 6 Parametric solutions of viscoelastic plasticity equation

温度/℃	$\sigma_{\max}$ /MPa	$\varepsilon_f$ /%	$n$	$R^2$
-30	8.30	0.1059	0.5087	0.99866
-60	18.61	0.0550	0.8372	0.99981
-80	24.21	0.0276	2.0919	0.99991
-120	24.24	0.0301	2.3048	0.99995
-180	25.89	0.0265	1.9069	0.99995

将计算结果和试验测得的应力-应变关系曲线进行对比, 如图 9 所示。

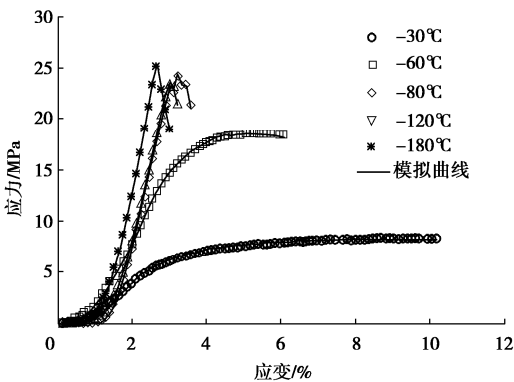


图 9 不同温度黏弹塑性方程试验值和计算值对比

Fig. 9 Comparison of experimental and calculated values of elastoplastic equation under different temperatures

由图 9 可以看出黏弹塑性方程和试验测得的应力-应变关系曲线相关性最好, 且温度越低拟合效果越好, 不仅能够很好地描述冻土单轴应力-应变关系曲线, 还可以计算出冻土的峰值强度。

黏弹塑性方程虽然可以描述应力-应变关系曲线, 但不能反映应力-应变与冻结温度的关系。为了

进一步研究冻土应力-应变和温度的关系, 在原有方程的基础上引入温度函数, 提出一个与超低温有关的复合方程描述冻土应力-应变关系曲线:

$$\varepsilon_f = a \cdot \exp(-b|T|) \quad , \quad (8)$$

$$\sigma / \sigma_{\max} = \left[ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right]^n \exp \left[ n \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right) \right] \quad , \quad (9)$$

式中,  $T$  为负温值 ( $-10^{\circ}\text{C} \geq T \geq -180^{\circ}\text{C}$ ),  $a$ ,  $b$ ,  $n$  为参数,  $\sigma_{\max}$  为试验实测值。再次检验冻结条件下, 应力-应变和温度相关的复合方程, 对方程求解, 参数如表 7 所示。

表 7 温度复合参数解

Table 7 Parametric solutions of composite temperature model

温度/℃	$\sigma_{\max}$ /MPa	$n$	$a$	$b$	$R^2$
-30	8.30	0.509	0.176	-0.105	0.99903
-60	18.61	0.837	1.682	-0.466	0.99981
-80	24.21	2.0919	0.8833	-0.0054	0.99992
-120	24.24	2.305	1.752	-0.009	0.99995
-180	25.89	1.907	0.031	0.0003	0.99997

由表 7 可见, 该方程随温度降低, 其  $R^2$  值越大, 相关性越好。将计算结果和试验测得的应力-应变关系曲线进行对比, 如图 10 所示。

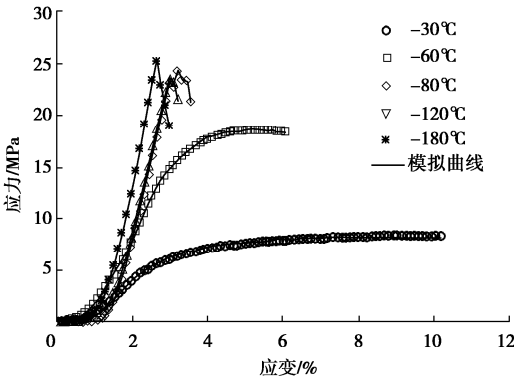


图 10 不同温度复合方程试验值和计算值对比

Fig. 10 Comparison of experimental and calculated values of composite equation under different temperatures

由图 10 可见, 引入温度的复合型应力-应变关系方程拟合精度较高, 和传统的黏弹塑性方程拟合效果相比, 拟合  $R^2$  值更大, 相关性更好, 提出的带有温度参数的应力-应变关系方程具有较好的适用性, 可以给工程技术的设计与实践提供理论支持。该复合方程可以很好的描述黏性土应力应变关系, 而由于碎石土成分复杂、颗粒形状多样、级配组成多变, 致使碎石土的力学特性异于土体与岩石, 对于碎石土类是否可以推广还有待研究。

### 3 结 论

以黑龙江省南部引嫩工程低液限黏土为研究对象,对冻土力学特性和应力-应变关系进行了研究,开展了超低温不同含水率条件下的冻土单轴抗压强度试验,基于黏弹塑性方程对冻土单轴抗压应力-应变关系曲线进行计算拟合,并对黏弹塑性方程进一步引入温度函数,分析了对不同温度的复合方程应力-应变关系曲线的适用性。主要结论如下:

(1) 在超低温条件下进行冻土单轴抗压强度试验,得到不同温度下土体的破坏情况,土温高于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时,土体呈弹塑性破坏,低于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时土体呈脆性破坏。

(2) 对试验数据整理分析,土温高于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时,冻土的抗压强度随土温降低而增大,低于 $-80^{\circ}\text{C}$ 时,抗压强度基本保持不变;对温度和抗压强度关系曲线进行拟合,相关系数 $R^2$ 达到0.98以上。

(3) 冻土随温度降低,弹性模量均增大;且含水率越高,抗压强度越大,弹性模量越大。

(4) 比较发现黏弹塑性方程可以统一描述超低温冻土应力-应变曲线的变化关系,通过引入温度函数,对超低温冻土应力-应变关系曲线拟合和参数的求解计算,提出一个与超低温冻土温度有关的复合型方程,表明提出的复合型方程可以很好地描述冻结温度与应力-应变曲线关系。

#### 参考文献:

- [1] 周洁, 李泽垚, 万鹏, 等. 组合地层渗流对人工地层冻结及周围工程环境效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 471 - 480. (ZHOU Jie, LI Ze-yao, WAN Peng, et al. Influence of combined stratum seepage on artificial stratum freezing method and surrounding engineering environment effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 471 - 480. (in Chinese))
- [2] MAURO A, NORMINO G, CAVUOTO F, et al. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy) [J]. Energies, 2020, 13(5): 1272.
- [3] TOUNSI H, ROUABHI A, TIJANI M, et al. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(10): 3889 - 3907.
- [4] 王建平, 刘伟民, 王恒. 我国人工地层冻结技术的现状与发展[J]. 建井技术, 2019, 40(4): 1 - 4, 25. (WANG Jian-ping, LIU Wei-min, WANG Heng. Present situation and development of artificial formation freezing technology in China[J]. Mine Construction Technology, 2019, 40(4): 1 - 4, 25. (in Chinese))
- [5] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40 - 44. (CHEN Ru-jie, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. Research progress and prospect of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 40 - 44. (in Chinese))
- [6] 张基伟, 刘书杰, 张松, 等. 富水砂层冻结壁形成过程声场响应特征研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2230 - 2239. (ZHANG Ji-wei, LIU Shu-jie, ZHANG Song, et al. Response characteristics of sound fields of stratum frozen wall of water-rich sand during developing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2230 - 2239. (in Chinese))
- [7] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3790 - 3794. (REN Shao-ran, FAN Zhi-kun, ZHANG Li-ang, et al. Cold shock mechanism and experimental study of liquid nitrogen on coal and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3790 - 3794. (in Chinese))
- [8] 马芹永. 人工冻土动态力学特性研究现状及意义[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 10-14. (MA Qin-yong. Research status of dynamic properties of artificial frozen soil and its significance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 10 - 14. (in Chinese))
- [9] CHU Y, SUN H, ZHANG D, et al. Nuclear magnetic resonance study of the influence of the liquid nitrogen freeze-thaw process on the pore structure of anthracite coal[J]. Energy Science and Engineering, 2020, 8(4): 1681 - 1692.
- [10] 郑晓静. 关于极端力学[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1266 - 1272. (ZHENG Xiao-jing. Extreme mechanics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1266 - 1272. (in Chinese))
- [11] 张楠, 李景芳, 张志明, 等. 超低温环境混凝土研究与应用综述[J]. 混凝土, 2012(12): 27 - 29. (ZHANG Nan, LI Jing-fang, ZHANG Zhi-ming, et al. State-of-art review on research and application of concrete at very low temperature[J]. Concrete, 2012(12): 27 - 29. (in Chinese))
- [12] 时旭东, 李亚强, 李俊林, 等. 不同超低温温度区间冻融循环作用混凝土受压强度试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 153 - 164. (SHI Xu-dong, LI Ya-qiang, LI Jun-lin, et



- al. Experimental study on the compressive strength of concrete undergoing freeze-thaw cycle actions with different ultralow temperature ranges[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, **37**(4): 153 – 164. (in Chinese))
- [13] ESMAEILI-FALAK M, KATEBI H, VADIATI M, et al. Predicting triaxial compressive strength and Young's modulus of frozen sand using artificial intelligence methods[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2019, **33**(3): 04019007.
- [14] KIM S Y, HONG W T, HONG S S, et al. Unfrozen water content and unconfined compressive strength of frozen soils according to degree of saturations and silt fractions[J]. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 2016, **32**(12): 59 – 67.
- [15] GÜLLÜ H, KHUDIR A. Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014(106/107): 55 – 65.
- [16] 陈鑫, 张泽, 李东庆, 等. 软弱夹层对水泥土单轴压缩影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(2): 398 – 412. (CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dong-qing, et al. Study on the influence of weak interlayer on uniaxial compression behaviors of cement soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(2): 398 – 412. (in Chinese))
- [17] 张遂, 匡航, 靳占英, 等. 高含水率冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, **47**(5): 116 – 124. (ZHANG Sui, KUANG Hang, JIN Zhan-ying, et al. An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, **47**(5): 116 – 124. (in Chinese))
- [18] 陈鑫, 张泽, 李东庆. 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响[J]. *水文地质工程地质*, 2019, **46**(6): 74 – 82. (CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dong-qing. Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, **46**(6): 74 – 82. (in Chinese))
- [19] 杜海民, 张淑娟, 马巍. 高含冰(水)量冻土的单轴抗压强度变化特性研究[J]. *冰川冻土*, 2014, **36**(5): 1213 – 1219. (DU Hai-min, ZHANG Shu-juan, MA Wei. Study of the uniaxial compressive strength characteristics of frozen soil with high ice /water content[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(5): 1213 – 1219. (in Chinese))
- [20] 黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻土的单轴抗压、抗拉强度特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2016, **38**(5): 1346 – 1352. (HUANG Xing, LI Dong-qing, MING Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(5): 1346 – 1352. (in Chinese))
- [21] 于长一, 刘爱民, 郭炳川, 等. 冻土不同拉伸试验强度差异性研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(增刊 2): 157 – 160. (YU Chang-yi, LIU Ai-min, GUO Bing-chuan, et al. Different tensile tests on difference of strength of frozen soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(S2): 157 – 160. (in Chinese))
- [22] 付伟, 汪稔, 胡明鉴, 等. 不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(1): 73 – 78. (FU Wei, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of relationship between uniaxial compressive strength and electrical resistivity of frozen soil under different temperatures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 73 – 78. (in Chinese))
- [23] 姚兆明, 张雯, 郭梦圆. 考虑温度效应冻结黏土内变量蠕变模型分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, **37**(12): 81 – 85, 91. (YAO Zhao-ming, ZHANG Wen, GUO Meng-yuan. An internal-variable creep model for frozen clay based on the temperature[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(12): 81 – 85, 91. (in Chinese))
- [24] 陈士威, 林斌. 原状与重塑冻结黏土单轴抗压对比试验[J]. *煤矿安全*, 2019, **50**(6): 62 – 66. (CHEN Shi-wei, LIN Bin. Contrast test on uniaxial compression of undisturbed and remolded frozen clay[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, **50**(6): 62 – 66. (in Chinese))
- [25] 李怀鑫, 林斌, 范登政. 人工冻黏土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. *煤矿安全*, 2020, **51**(7): 55 – 60. (LI Huai-xin, LIN Bin, FAN Deng-zheng. Uniaxial compressive strength test on artificially frozen clay[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, **51**(7): 55 – 60. (in Chinese))
- [26] VIALOV S S. The strength and creep calculation of the barriers made of frozen soil[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1963, **11**(9): 25 – 26.
- [27] KONDER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, **89**(1): 115 – 143.
- [28] 王丽琴, 鹿忠刚, 邵生俊. 岩土体复合幂-指数非线性模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(5): 1269 – 1278. (WANG Li-qin, LU Zhong-gang, SHAO Sheng-jun. A

- composite power exponential nonlinear model of rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1269 – 1278. (in Chinese))
- [29] 朱元林, 张家懿, 彭万巍, 等. 冻土的单轴压缩本构关系[J]. 冰川冻土, 1992, **14**(3): 210 – 217. (ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, PENG Wan-wei, et al. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, **14**(3): 210 – 217. (in Chinese))
- [30] 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 – 84. (ZHANG Ya-qin, YANG Ping, JIANG Wang-yang, 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 – 84. (in Chinese))
- [31] 杜洋, 唐丽云, 杨柳君, 等. 基于核磁共振下的冻土-结构正融过程界面特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2316 – 2322. (DU Yang, TANG Li-yun, YANG Liu-jun, et al. Interface characteristics of frozen soil-structure thawing process based on nuclear magnetic resonance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2316 – 2322. (in Chinese))
- [32] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (MA Wei, WANG Da-yan. Frozen Soil Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [33] PITTMAN F, MOHAMMED A, CEY E. Effects of antecedent moisture and macroporosity on infiltration and water flow in frozen soil[J]. Hydrological Processes, 2020, **34**(3): 795 – 809.
- [34] 赵晓东, 周国庆. 温度梯度冻土蠕变变形规律和非均质特征[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 390 – 394. (ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing. Creep deformation and heterogeneous characteristics for frozen soils with thermal gradient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 390 – 394. (in Chinese))

## 新书介绍:《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》

陈正汉教授的专著《非饱和土与特殊土力学——理论创新、科研方法及治学感悟》由科学出版社于 2021 年 7 月出版发行。全书内容分为三篇及附录。正文分为 7 章: 第一篇(第 1 章和第 2 章)系统介绍作者及其学术团队在非饱和土与特殊土力学的基本理论和本构模型研究方面取得的主要创新成果, 对非饱和土与特殊土力学及其工程应用的新进展进行全面系统的总结, 并对今后的研究工作提出若干建议; 第二篇(第 3 章至第 5 章)对土力学的理论模型和科学研究方法进行系统论述, 总结作者在加强团队创新文化建设和学风建设方面的经验, 阐述知行合一理念的 formation 及对发展岩土力学理论体系的思考; 第三篇(第 6 章和第 7 章)是作者的学术奋斗生涯和治学感悟。书末

附录共 17 个, 主要介绍第十届全国土力学及岩土工程学术会议的盛况和办会经验、非饱和土与特殊土专业委员会的章程及开展的国内外学术交流活动、部分同行专家对作者学术成果的评价。内容丰富、自主创新、深入系统、推理严谨、数据翔实、旁征博引、表述精炼是该书的鲜明特色。

该书可供从事岩土力学与工程的教学、科研人员及研究生参考阅读。

顺便指出, 陈正汉教授与秦冰博士合著的《缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用》一书已由科学出版社在 2017 年 7 月出版发行。该书共 10 章, 是国内关于高放废物深地质处置库的缓冲/回填材料研究成果的第一本专著。

(本刊编辑部)