

冻土单轴力学行为的温度与应变率效应及本构关系研究*

梁靖宇¹, 胡晓霞¹, 何林泓¹, 路德春², 王国盛²

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京, 100044; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京, 100124)

摘要: 冻土作为一种由土颗粒、冰、水及气体组成的多相复合岩土材料, 其单轴力学行为具有显著的温度和应变率敏感性。本研究通过开展 12 组不同温度 ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和应变率 (10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1}) 组合条件下的冻土单轴压缩试验, 系统分析了冻土单轴力学特性演化规律, 包括温度条件降低与应变率条件增大导致的强度提升与延性变形骤降的变形规律, 以及峰值应力、峰值应变以及残余应力受温度-应变率耦合作用的显著调控。针对温度-应变率耦合行为建模难题, 基于平移变换引入了三向抗拉强度 σ_t , 推导了黏聚效应修正的剑桥模型应变硬化表达式, 并类比构建了冻土的单轴压缩应变硬化表达式。通过构建潜在单轴抗压强度的应变驱动劣化函数, 获得了能够描述不同温度与应变率条件下冻土单轴压缩力学行为的应变硬化/软化特征的本构关系。结合温度-应变率相关试验结果分析确定了 5 个模型参数, 并进行了试验验证。结果表明, 该模型能有效捕捉温度与应变率耦合影响下的冻土力学响应, 为冻土力学相关工程的设计与分析提供理论支撑。

关键词: 冻土; 温度; 应变率; 单轴压缩试验; 本构关系

中图分类号: TU445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(XXXX)XX-0001-13

Study on Temperature-Strain Rate Effects and Constitutive Relationship of Frozen Soil under Uniaxial Mechanical Behavior

LIANG Jingyu¹, HU Xiaoxiao¹, HE Linhong¹, LU Dechun², WANG Guosheng²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Frozen soil, as a multiphase geomaterial composed of soil particles, ice, unfrozen water, and air, exhibits pronounced temperature and strain rate dependence on its uniaxial mechanical behavior. This study conducted uniaxial compression tests under 12 combinations of temperatures ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) and strain rates (10^{-3} s^{-1} , 10^{-4} s^{-1} , 10^{-5} s^{-1}), systematically revealing the

* 收稿日期: 2025-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U25B20214, 52025084, 52108294), 北京建筑大学金字塔计划 (No. JDYC20220812), 北京建筑大学硕士研究生创新项目 (No. PG2025059)。

作者简介: 梁靖宇 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事冻土工程特性及其本构模型的研究。E-mail: liangjy@bucea.edu.cn

通信作者: 路德春 (1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土塑性力学与城市地下工程研究。E-mail: dechun@bjut.edu.cn

evolution of mechanical behavior, including strength enhancement and ductility reduction with decreasing temperature or increasing strain rate, along with significant coupling effects of temperature-strain rate on peak stress, peak strain, and residual stress. To address the challenge in modeling the coupling behavior of temperature and strain rate, the transformed stress incorporating the triaxial tensile strength (σ_T) is adopted to derive the strain hardening expression based on the Cambridge model incorporating the cohesive effect. This expression is analogously extended to formulate a uniaxial compressive hardening expression. Furthermore, a strain-driven degradation function for potential compressive strength is proposed to complete the uniaxial constitutive relationship for frozen soil. Five parameters of the model were determined by analyzing the experimental rules relating to temperature and strain rate, and model verification was also conducted. The results demonstrate that the model effectively captures the mechanical response of frozen soils under the coupled effects of temperature and strain rate, thereby providing a theoretical basis for the design and analysis of engineering projects involving frozen soils.

Keywords: Frozen soil; Temperature; Strain rate; Uniaxial compression test; Constitutive relationship

0 引言

我国冻土分布面积广阔,从青藏高原多年冻土区到东北季节性冻土带,各类寒区工程(如青藏铁路、青藏公路、寒区桥梁基础)的安全性及耐久性设计均依赖于对冻土力学特性的合理认知。冻土作为由土颗粒、冰、水与气体组成的多相岩土材料,其单轴力学行为对温度与应变率具有显著的敏感性,构成了寒区工程力学领域的核心科学问题。

针对冻土的温度与应变率相关单轴力学特性,试验研究主要集中于单轴抗压强度与受力变形规律的分析。冻土的温度相关性主要体现在其对抗压强度的影响。冻土抗压强度会随温度条件的降低而增加,且呈线性增大或幂函数型增长的趋势。这一特性的物理机制主要源于孔隙冰的胶结与协同承载作用^[1],即随着温度的降低,土中未冻水冻结成冰,将土颗粒胶结的同时,协同土颗粒共同承载,显著提高了冻土的抗压强度。同时,由于冰相的存在,冻土的力学行为也表现出了显著的应变率相关性^[2],其抗压强度对应变率的敏感性仅次于温度效应^[3]。多种冻土的单轴压缩试验研究表明,冻土的抗压强度随应变率的升高而增大。张俊兵等^[4]、李海鹏等^[5]以及Zhao等^[2]分别对饱和冻结兰州粉土、饱和冻结黏土以及冻结砾石土开展了单轴压缩试验,试验结果均表明冻土的单轴抗压强度会以幂函数形式随应变率的增加而提高。冻土抗压强度的应变率相关性主要源于内部孔隙冰的流变性,尤其

是颗粒间的孔隙冰在低应变率条件下蠕变明显,降低了冻土约束外荷载的能力,而随着应变率的增大,孔隙冰来不及蠕变,使冻土瞬时强度增大^[6,7]。同时,应变率还会显著改变冻土的变形模式。Girgis等^[8]对人工冻结砂质黏土的单轴压缩试验的研究表明,在较高应变率($1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)条件下,冻土表现出先硬化后软化的特征,趋于脆性变形,而低应变率($1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)条件下,冻土的应变硬化特征明显,趋于延性变形。这种变形模式的转变反映出冻土的力学行为对应变率条件的强烈依赖性。实际上,冻土的变形模式不仅受应变率影响,同样受温度的影响。Xu等^[9]通过对Helin黄土的单轴压缩试验研究发现,冻土的变形规律表现为先硬化后软化的变形特征,在低温高应变率条件下($-7^\circ\text{C}/10^{-2} \text{ s}^{-1}$),冻土应变软化特征明显,在较高负温与较低应变率条件下($-2^\circ\text{C}/10^{-5} \text{ s}^{-1}$),冻土应变硬化特征明显。罗飞等^[10]针对寒区冻结冰碛土开展低温常规三轴试验,发现其应力应变关系均为应变软化型,围压与温度共同影响软化程度和剪胀特性,进一步证实了寒区冻土变形模式的复杂性。上述关于温度与应变率效应的冻土试验研究,不仅揭示了冻土力学行为的基本规律,更为冻土本构关系的构建提供了试验依据。然而,现有冻土单轴试验研究主要集中于单轴抗压强度与硬化/软化等变形特征的分析,较少探讨应变软化后的残余特性,难以充分分析冻土单轴压缩受力变形的全过程。

为合理描述冻土单轴压缩力学特征,现有研究主要基于不同假定条件来建立冻土的单轴本构关

系。Vialov^[11]提出了幂函数模型用于描述冻土单轴应力—应变关系。为冻土单轴本构关系的建立奠定了重要基础,但尚未合理考虑温度与应变率对冻土力学行为的显著影响。鉴于此,已有研究基于冻土单轴压缩试验分析了温度与应变率对峰值应力的显著影响,并利用幂函数量化了温度降低与应变率升高条件下峰值应力增大的特性^[12-14]。峰值应力的温度与应变率相关性描述为冻土单轴本构关系的建立提供了强度基础,然而,峰值应力特征实际上也与冻土的受力变形模式与特征显著相关。Liu等^[15]发现改良冻结砂土的单轴应力—应变曲线主要表现为应变硬化特征,通过建立幂函数模型综合考虑了温度与应变率耦合效应。Zhu等^[16,17]通过建立元件模型反映了冻土在不同温度与加载速率下的应变硬化/软化变形行为。路德春等^[18]基于黏聚—摩擦联合硬化规律与非正交塑性流动法则,构建了黏土岩的三维弹塑性本构模型,揭示了强度参数随塑性内变量的演化机制,为描述材料硬化/软化行为提供了新思路。基于Helin黄土的单轴压缩试验结果与弹塑性假定,Xu等^[9]在Mises屈服准则基础上,通过构建温度与应变率相关的硬化参量,获得了能合理考虑不同温度与应变率影响的增量型本构关系。罗会武等^[19]在饱和土单向冻结过程的水—热—力耦合分析中,将修正剑桥模型应用于未冻区土体,为冻土本构模型与多场耦合理论的结合提供了思路。任建喜等^[20]针对冻融裂隙砂岩建立内变量疲劳本构模型,强调了损伤演化与内变量表征在冻土本构建模中的重要性。王丹等^[21]通过对比多种本构模型在厚冲积层基坑变形分析中的适用性,证实了修正剑桥模型在描述土体应力—应变关系中的可靠性。综上,冻土单轴应力—应变关系呈复杂非线性特征,温度与应变率的耦合作用显著影响峰值应力、峰值应变以及残余应力等关键力学参数。然而,现有冻土单轴本构关系研究较少分析温度与应变率对残余应力的影响规律,难以合理描述温度与应变率影响下不同的峰后软化特征。同时,现有冻土单轴本构研究多建立全量型本构关系,其实质上是对函数的合理利用,对冻土变形规律的反映主要依赖于对函数的认识,难以分步描述其力学特性演化过程。

针对冻土单轴力学行为的温度与应变率相关性,本文采用标准砂作为试验材料,通过开展12组不同温度和应变率组合条件下的冻土单轴压缩试

验,分析峰值应力、峰值应变以及残余应力等力学参数的温度与应变率相关规律。进一步,基于引入三向抗拉强度 σ_r 的平移变换应力推导了剑桥模型的硬化本构关系,并通过类比构建冻土单轴压缩增量型本构关系,结合冻土潜在单轴抗压强度随应变发展而劣化函数,实现了温度与应变率相关的冻土单轴压缩力学特性与变形规律的描述,从而为寒区工程设计与分析提供数据支撑与理论基础。

1 冻结砂土的单轴压缩试验

为系统研究温度与应变率对冻土单轴压缩力学特性的耦合影响,本研究以厦门ISO标准砂(中级砂)为试验对象,开展一系列冻结饱和砂土试样的单轴压缩试验,获得不同温度与应变率组合条件下的冻土单轴压缩试验结果,为冻土单轴压缩力学特性分析及本构关系的构建与验证提供试验数据支撑。

1.1 试验方案与可靠性分析

标准砂是冻结砂土力学行为研究中最常用的材料,凭借其稳定的颗粒级配范围与物理性质,可有效消除材料变异性的影响,为土的力学行为研究提供可复现的试验结果,从而有效地将试验结果的变化归因于目标因素。鉴于此,本次试验选取厦门ISO标准砂(中级砂)作为研究对象。依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)测定砂土的基本物理指标为:土粒比重 $G_s=2.68$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.855$,最小孔隙比 $e_{\min}=0.576$ 。通过对所采用砂土进行筛分试验,获得颗粒粒径级配曲线如图1所示,可以看出在1—0.5 mm粒径区间内的砂土颗粒占比最高,而大于1 mm和小于0.5 mm的颗粒含量较低,约4%和1.8%,砂土颗粒粒径分布较为集中,均匀性较好。试样制备采用路德春等^[22,23]研发的制样模具,该模具由6块铝合金板材经螺栓连接组装而成,可制备尺寸为75 mm×75 mm×150 mm的长方体试样。试样制备过程中,经多次试制发现相对密实度 D_r 约为60%时,试样最容易制备且重复性较好,因此,本文试验采用试样的相对密实度 $D_r=60%$,测定试样的孔隙比 e 为0.688。

试验研究所采用的冻土单轴压缩仪包括控温系统、加载系统以及监测系统共三部分,如图2所示,其中,控温系统包括控温箱体、控温面板;加载

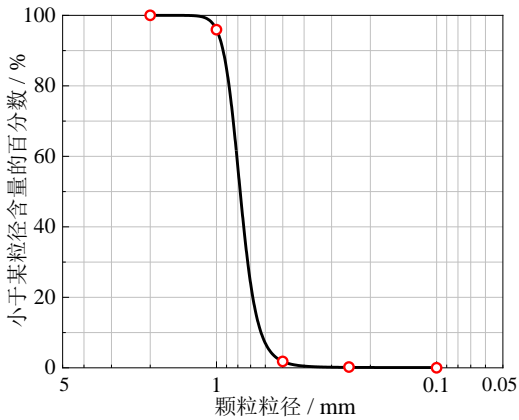


图1 颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Materials and its grain size grading curve

系统包括加载框架、加载杆件、加载底座以及压头与试样底座；监测系统包括位移与应力传感器、温度传感器以及数据采集仪。该试验系统可实现 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的稳定控温，控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大轴向力100KN的竖向加载，加载过程中可同步监测箱体内温度、加载位移及竖向荷载。

本研究采用应变控制进行加载，设定温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，应变率为 10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 和 10^{-5} s^{-1} ，共包括12组不同温度与应变率条件下的组合工况，具体试验工况见表1。试验终止条件设定为轴向应变达到15%或发生失稳破坏。

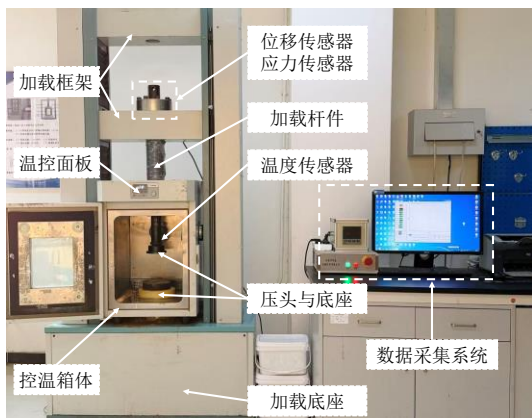


图2 冻土单轴压缩仪

Fig. 2 Uniaxial compression tester for frozen soil

为保证试验结果的可重复性，本文独立制备了具有相同密实度的3组冻土试样，并在温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变率为 10^{-3} s^{-1} 的条件下进行了三次重复的单轴压缩试验，所得应力—应变曲线如图3所示。对比分析表明：当轴向应变 $\epsilon_1 < 2\%$ 时，对应硬化与软化段的应

表1 冻结砂土的单轴压缩试验工况

Table 1 Uniaxial compression test conditions for frozen sand

温度	应变率
$-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1}
$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1}
$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1}
$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	10^{-3} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1}

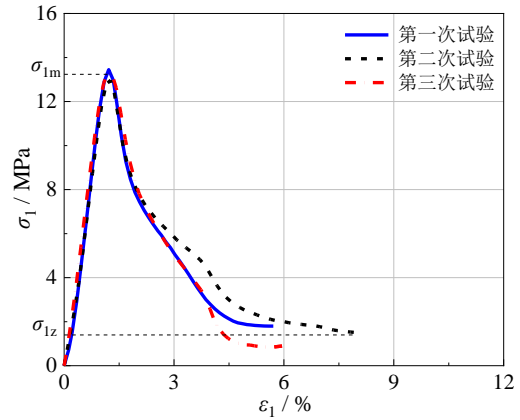


图3 重复性冻土的单轴压缩 ϵ_1 - σ_1 关系曲线

Fig. 3 Uniaxial compression ϵ_1 - σ_1 relationship curve of repeatable frozen soil

力—应变曲线基本重合；当 $\epsilon_1 \geq 2\%$ 后，曲线开始呈现分散现象。图3标注了三次重复性试验曲线的峰值应力 σ_{1m} 与残余应力 σ_{1z} 的平均值，可以看出三次试验的峰值应力基本重合，而对应残余应力略有偏差但相差不大，曲线整体形态基于一致。试验结果表明，试验仪器性能及操作流程对冻土变形与强度特性的影响较小，尽管在较大应变时($\epsilon_1 \geq 2\%$)存在离散情况，但峰值应力与残余应力的一致性较好，充分证明本试验具有良好的重复性和较高的可靠性。

1.2 冻土的温度与应变率相关力学特性分析

基于不同温度与不同应变率组合工况下的冻土单轴压缩试验结果，本节首先分析冻土单轴应力—应变关系受温度与应变率影响的规律，进而深入探讨温度与应变率对峰值应力、峰值应变以及残余应力等力学参数的耦合影响规律。

1.2.1 冻土的单轴压缩应力—应变关系

通过单轴压缩试验系统获得了某一恒定温度($T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下冻土试样在3种不同应变率加载($\dot{\epsilon} = 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、 10^{-4} s^{-1} 和 10^{-5} s^{-1})条件下的单轴压缩应力—应变试验结果，如

图4(a)~(d)所示。可以看出,冻土的单轴抗压强度与残余应力均表现出对温度和应变率的显著依赖性。

在恒定的温度条件下,冻土的峰值应力(即单轴抗压强度)随着应变率的增加表现出显著增大的趋势,同时,峰值应力对应的峰值应变随着应变率的增加也表现出增加的趋势。这主要是由于较高的应变率使得冻土内部的颗粒和冰晶结构来不及充分调整,以适应外部加载条件的快速施加^[6]。此外,在 $T=-5^{\circ}\text{C}$ 条件下冻土的残余应力随着应变率的增加表现出增大的趋势;在 $T=-10^{\circ}\text{C}$ 条件下,残余强度表现为 10^{-5} s^{-1} 与 10^{-4} s^{-1} 的应变率下基本一致, 10^{-3} s^{-1} 的应变率下更低;而在 $T=-15^{\circ}\text{C}$ 和 -20°C 条件下,残余应力随着应变率增加表现出显著的减小趋势。同时,应力-应变关系曲线形态也随应变率显著变化:在 10^{-5} s^{-1} 的应变率下,曲线达到峰值应力后下降平缓,冻土趋于延性变形;而在 10^{-3} s^{-1} 的应变率下,曲线在达到峰值应力后迅速下降,冻土趋于发生脆性变形。已有研究表明,这一现象是由于快速加载过程加速了冻土内

部微裂纹的扩展速率,内部微结构尚来不及调整以耗散能量,从而在峰值应力后迅速发生破坏^[7]。

在恒定应变率条件下,随着温度从 $T=-5^{\circ}\text{C}$ 到 -20°C ,冻土的峰值应力整体上表现出增加的趋势。然而,残余应力随温度变化的规律在不同应变率条件下表现复杂,在应变率为 10^{-5} s^{-1} 时,残余应力随温度降低表现出增大的趋势,而在 10^{-3} s^{-1} 条件下,残余应力随温度降低表现出明显的减小趋势。这一复杂的变化规律表明,单纯脱离应变率条件来讨论温度影响实际上是不合理的。此外,温度对冻土的单轴压缩应力-应变曲线形态也具有显著影响:在 $T=-5^{\circ}\text{C}$ 条件下,应力达到峰值应力后的下降段相对平缓,趋向于延性变形,而随着温度的降低,峰后曲线的下降趋势显著,趋向于脆性变形。

冻土单轴压缩试验结果表明,冻土力学特性呈现显著的温度与应变率耦合效应:其变形规律整体表现为低温高应变率条件下峰值应力较大,峰后曲线下降明显,变形模式趋于脆性,而在较高负温低应变率条件下峰值应力较小,峰后曲线下降趋缓,

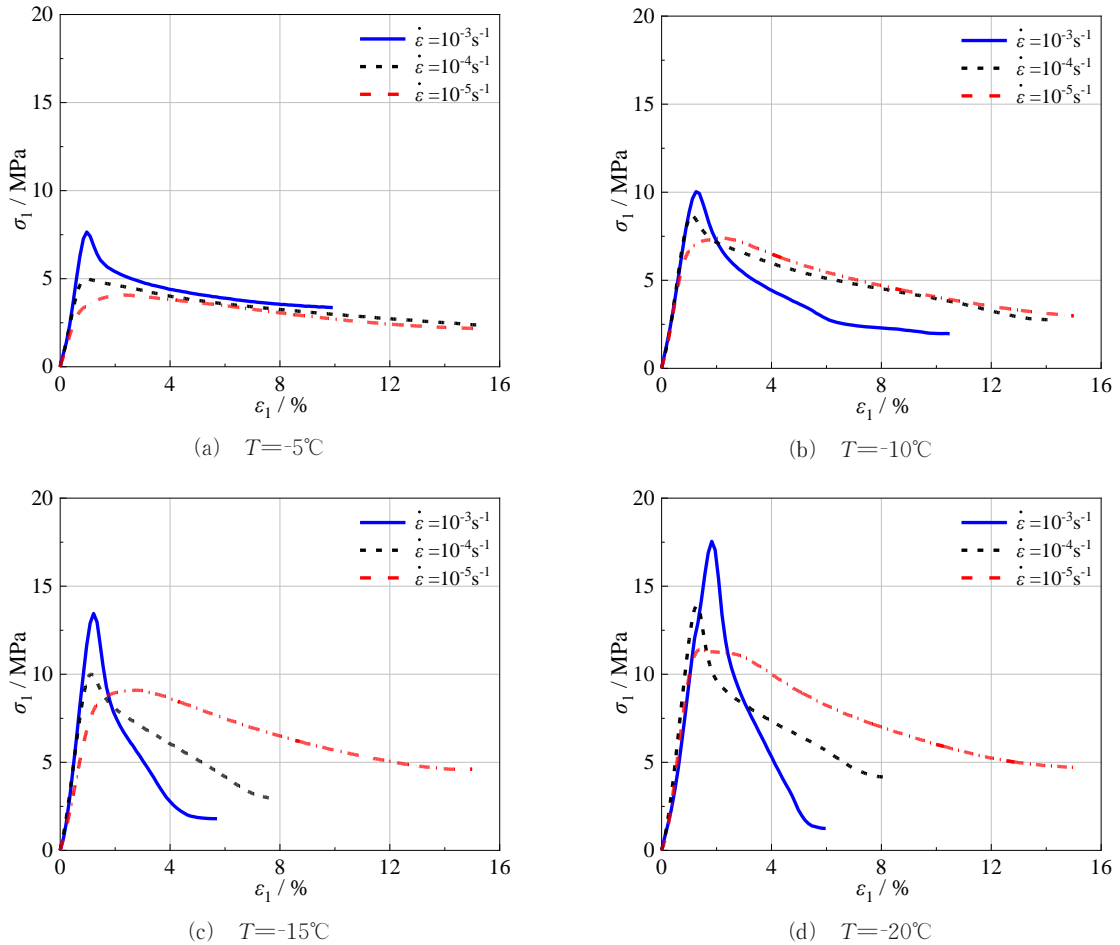


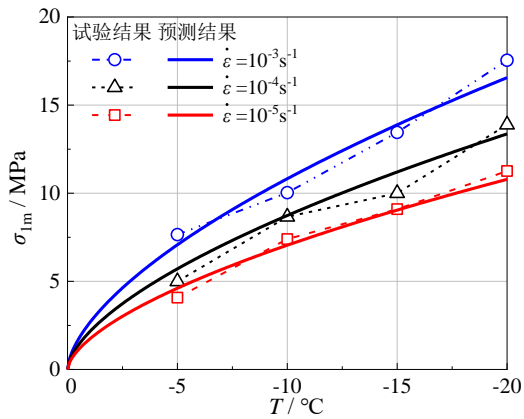
图4 不同温度下三种应变率的冻土 ϵ_1 - σ_1 关系曲线

Fig. 4 ϵ_1 - σ_1 relationship curves of permafrost at different temperatures for three strain rates

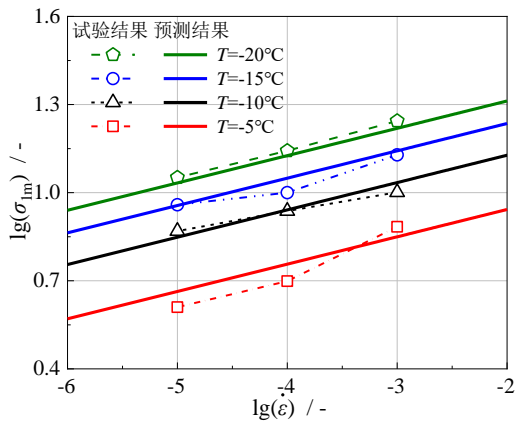
变形模式趋于延性。然而,残余应力受温度与应变率影响规律并非单调,而是呈现出耦合影响规律。温度与应变率对冻土单轴力学行为的耦合影响尚需进一步讨论与探索。

1.2.2 峰值应力 σ_{1m}

由试验结果知冻土的峰值应力 σ_{1m} 受温度 T 与应变率 $\dot{\epsilon}$ 的耦合影响显著。整理得到 T 、 $\dot{\epsilon}$ 与 σ_{1m} 的关系,如图 5 所示。在温度效应方面,当 $\dot{\epsilon}$ 恒定时, σ_{1m} 随 T 的降低呈非线性增大的趋势;在应变率效应方面,将 σ_{1m} 随 $\dot{\epsilon}$ 变化的试验结果整理到双对数坐标系内,可以看出,当 T 恒定时, $\lg(\sigma_{1m})$ 随 $\lg(\dot{\epsilon})$ 的增加大体呈现出线性增大的趋势。 σ_{1m} 随 T 与 $\dot{\epsilon}$ 变化的规律分析表明,其显著受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 的耦合影响。



(a) 不同应变率作用下峰值应力随温度变化的规律



(b) 不同温度作用下峰值应力随应变率变化的规律

图 5 峰值应力随温度与应变率变化的规律

Fig. 5 Variation of peak stress with temperature and strain rate

为量化 T 与 $\dot{\epsilon}$ 对 σ_{1m} 的耦合影响,本文结合图 5 所示冻土非线性的 σ_{1m} 变化规律以及现有学者研究成果^[24],利用幂律关系量化 T 与 $\dot{\epsilon}$ 对 σ_{1m} 耦合影响:

$$\sigma_{1m} = A \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, T 为温度, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率, $T_0 = -1^\circ\text{C}$ 为参考温度, m 为应变率效应系数,表征应变率敏感性, n 为温度效应系数,表征温度敏感性, A 为经验系数。采用最小二乘法对试验数据进行非线性回归分析,得到表征 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合效应的 σ_{1m} 幂律关系式:

$$\sigma_{1m} = 5.01 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{0.093} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.61} \quad (2)$$

式(2)预测结果与试验结果的对比如图 6 所示,红色立方体为试验结果,黑色球体为预测结果。由图看出,在不同 T 与 $\dot{\epsilon}$ 的组合条件下,预测结果呈现出的幂律型变化趋势能够对试验结果进行较好的预测,说明所给出的 σ_{1m} 表达式(2)能够合理描述 σ_{1m} 受 T 和 $\dot{\epsilon}$ 组合条件的耦合影响规律。

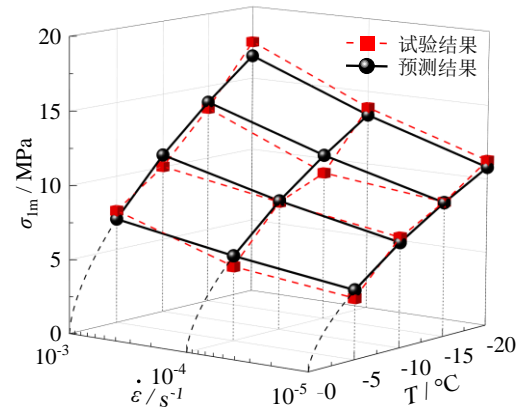


图 6 峰值应力试验结果与预测结果的对比

Fig. 6 Comparison of peak stress test results with predicted results

1.2.3 峰值应变 ϵ_{1m}

将试验结果整理到半对数坐标系 $\epsilon_{1m} - \lg(\dot{\epsilon})$ 中,可得不同 T 值条件下,峰值应变 ϵ_{1m} 随 $\lg(\dot{\epsilon})$ 变化的试验结果,如图 7 所示。在恒定 T 条件下,不同 $\dot{\epsilon}$ 条件对 ϵ_{1m} 的影响差异最大为 1.6%,而在恒定 $\dot{\epsilon}$ 条件下,不同 T 条件下的 ϵ_{1m} 差异最大为 0.85%。特别地,当温度为 -20°C 时,应变率为 10^{-3} s^{-1} 条件下的冻土应力-应变曲线硬化段相对于较低应变率为 10^{-4} s^{-1} 与 10^{-5} s^{-1} 条件下的应力-应变曲线硬化段整体偏右,这一点与本文其他温度条件下的规律以及现有研究结论不一致,这可能是由于加载初始阶段时加载杆与试样接触不充分导致,同时也是 ϵ_{1m} 差异的主要来源。鉴于此,本研究根据试验结果的整体规律认

为应变率对峰值应变的影响相较于温度更为显著。同时,为了简单起见,本文重点关注 $\dot{\epsilon}$ 对 ϵ_{1m} 的影响。基于图7所示规律可以看出,随着 $\dot{\epsilon}$ 的增加, ϵ_{1m} 逐渐减小并大致趋于稳定。因此,为量化应变率效应,本文建立 ϵ_{1m} 与 $\dot{\epsilon}$ 的关系式为:

$$\epsilon_{1m} = B \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right) + \epsilon_{1m0} \quad (3)$$

式中, B 为应变率效应系数, C 为参考应变率, ϵ_{1m0} 为应变率较大条件下峰值应变。在确定参数过程中,计算不同温度条件下 ϵ_{1m} 的平均值,得到三种应变率对应的均值应变,分别为0.013 16,0.011 06和0.023 44,并采用最小二乘法对均值应变进行非线性回归分析,得到式(3)中的待定参数 B 、 C 和 ϵ_{1m0} ,从而得出 ϵ_{1m} 的具体表达式:

$$\epsilon_{1m} = 0.02 \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4.72}}\right) + 0.012 \quad (4)$$

基于式(4)绘制出 $\epsilon_{1m} - \lg(\dot{\epsilon})$ 坐标系中的预测曲线,如图7中粉色曲线。由图看出,预测结果合理捕捉了 ϵ_{1m} 随 $\dot{\epsilon}$ 变化的规律,整体呈现出先下降、后逐渐趋于平缓的趋势。预测结果与试验结果吻合效果较好,说明所建立的关系式能合理描述 $\dot{\epsilon}$ 对 ϵ_{1m} 的影响。

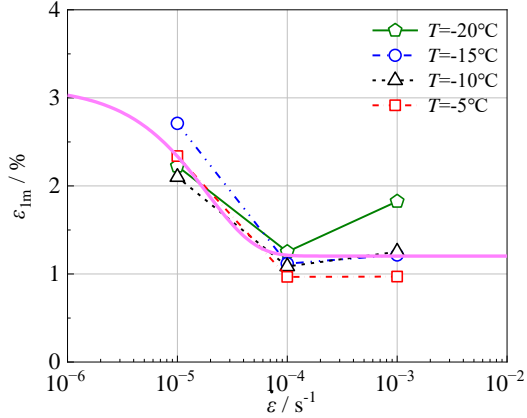


图7 峰值应变试验结果与预测结果的对比

Fig. 7 Comparison of peak strain test results with predicted results

1.2.4 残余应力 σ_{1z}

残余应力 σ_{1z} 是指应力-应变曲线中峰值后软化阶段趋于稳定的应力值,在本文中选取应变软化阶段趋于稳定的应力值或轴向应变达到15%对应的应力值作为冻土的残余应力。整理得到 σ_{1z} 随 T 与 $\dot{\epsilon}$ 变化的规律,如图8所示。基于图8(a)可知,在 $\dot{\epsilon}=10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 与 10^{-4} s^{-1} 条件下, σ_{1z} 随 T 的降低而增大,而在 $\dot{\epsilon}=10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下, σ_{1z} 随 T 的降低而减小的趋

势。类似的,如图8(b)所示,在 $T=-5^\circ\text{C}$ 条件下, σ_{1z} 随 $\dot{\epsilon}$ 的增大而增大,而在 $T=-10^\circ\text{C}$ 、 -15°C 、 -20°C 条件下, σ_{1z} 随 $\dot{\epsilon}$ 的增大而减小。基于 σ_{1z} 受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响的试验结果分析发现,在四种温度与三种应变率组合条件下,存在一个特征交点,且 σ_{1z} 随 T 与 $\lg\dot{\epsilon}$ 变化的规律大体呈线性。为量化这一耦合影响规律,本文建立 σ_{1z} 受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响的关系式为:

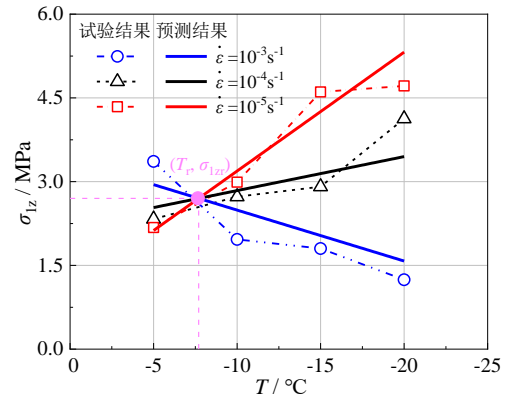
$$\sigma_{1z} = D \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_r}\right)(T - T_r) + \sigma_{1zr} \quad (5)$$

式中, T_r 为交点温度, $\dot{\epsilon}_r$ 为交点应变率, σ_{1zr} 为交点条件对应的残余应力, D 为 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合效应系数。

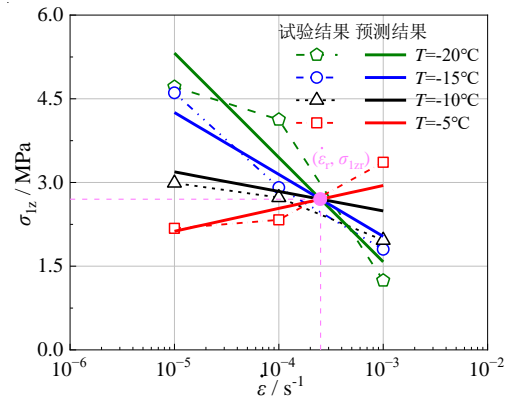
基于试验结果分析可得,交点温度 $T_r = -7.7^\circ\text{C}$,交点应变率 $\dot{\epsilon}_r = 10^{-3.6}$,交点残余应力 $\sigma_{1zr} = 2.7 \text{ MPa}$,据此可拟合得到式(5)中的耦合效应系数 $D = 0.152$ 。因此, σ_{1z} 受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响的具体表达式为:

$$\sigma_{1z} = 0.152 \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-3.6}}\right)(T + 7.7) + 2.7 \quad (6)$$

利用式(6)对试验结果进行预测,所得对比图如图8所示。所得 σ_{1z} 受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响的试验结果



(a) 不同应变率作用下残余应力随温度变化的规律



(b) 不同温度作用下残余应力随应变率变化的规律

图8 残余应力随温度与应变率变化的规律

Fig. 8 The relationship of residual stress variation with temperature and strain rate

与预测结果的三维对比图如图9所示,图中红色立方体为试验结果,黑色球体为预测结果。通过试验结果和预测结果对比可知所给定的表达式(6)能够合理地描述残余应力 σ_{1z} 在不同 T 和 $\dot{\epsilon}$ 组合下的变化规律,具有良好的预测效果。

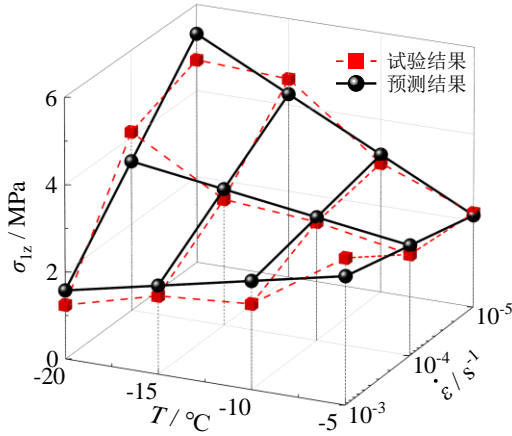


图9 残余应力试验结果与预测结果的对比

Fig. 9 Comparison of residual stress test results with predicted results

2 温度与应变率相关的冻土单轴本构关系

冻土作为一种特殊的岩土材料,其土颗粒被孔隙冰胶结,使其力学行为表现出显著的黏聚效应。为了合理描述冻土的黏聚效应,本节利用三向抗压强度 σ_T 反映冻土的黏聚效应,并通过引入平移变换应力概念,将 σ_T 引入剑桥模型,推导得出平移变换应力表达的塑性剪应变增量表达式。剑桥模型是针对饱和黏性土力学行为而建立的模型,并不适用于砂土力学行为描述,但其反映土的应变硬化规律能够进一步发展用于描述不同类型土的力学行为^[25, 26]。本文针对剑桥模型无法描述冻土单轴压缩条件下应变软化特性的问题,本节通过类比应力比与塑性剪应变的简单表达式,构建得出冻土的增量型单轴本构关系,并通过引入潜在抗压强度随应变发展而退化的表达式,并结合基于试验结果构建得到的 σ_{1m} 、 ϵ_{1m} 以及 σ_{1z} 表达式,用于合理描述温度与应变率影响的冻土单轴压缩受力变形规律。

2.1 考虑黏聚特性的剑桥模型硬化本构关系

剑桥模型采用临界状态理论,能够合理描述剪

切过程中土的应变硬化规律,具有参数少且物理意义明确的优势。然而,其无法合理描述冻土的单轴压缩变形规律。为了能够引入冻土的黏聚强度,本文通过将三向抗压强度 σ_T 引入平移变换应力 $\bar{\sigma}_{ij}$ 中,从而构建可合理描述黏聚效应的本构关系。所采用平移变换应力表达式为:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} + \sigma_T \delta_{ij} \quad (7)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量, σ_T 为三向抗拉强度, δ_{ij} 为Kronecker符号,当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$,当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。在平移变换应力空间中表达的剑桥模型屈服函数为:

$$f = M \ln \bar{p} + \frac{\bar{q}}{\bar{p}} - M \ln \bar{p}_x \quad (8)$$

式中, \bar{p} 和 \bar{q} 分别为变换应力空间中的平均应力与剪应力, M 为平移变换应力空间中的临界状态应力比,即 $M = \bar{q}/\bar{p}$ 。 \bar{p}_x 为平移变换应力空间中的等效平均应力,其与塑性体应变之间关系为:

$$\bar{p}_x = \bar{p}_0 \exp\left(\frac{\epsilon_v^p}{l_p}\right) \quad (9)$$

式中, $l_p = (\lambda - \kappa)/(1 + e_0)$,其中, λ 和 κ 分别为 $e - \ln p$ 坐标系中等向压缩与回弹线的斜率, e_0 为初始孔隙比。

通过式(8)可得一致性条件表达式为:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \bar{p}} d\bar{p} + \frac{\partial f}{\partial \bar{q}} d\bar{q} + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} d\epsilon_v^p = 0 \quad (10)$$

根据平移变换应力空间中的相关流动法则可得塑性应变增量:

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} \quad (11)$$

利用式(11)可得塑性体应变增量表达式,并将其代入式(10),并整理得到:

$$\Lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \bar{p}} d\bar{p} + \frac{\partial f}{\partial \bar{q}} d\bar{q}}{\frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial \bar{p}}} \quad (12)$$

式中,屈服函数 f 对应力参量的偏导数可基于式(7)–(9)确定。其中,屈服函数对 \bar{p} 和 \bar{q} 的偏导数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \bar{p}} = \frac{M}{\bar{p}} - \frac{\bar{q}}{\bar{p}^2} \\ \frac{\partial f}{\partial \bar{q}} = \frac{1}{\bar{p}} \end{cases} \quad (13)$$

屈服函数对塑性体应变的偏导数为:

$$\frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} = - \frac{M}{l_p} \quad (14)$$

将式(13)–(14)代入式(12),可得塑性乘子的表达式:

$$\Lambda = \frac{l_p}{M} \left(d\bar{p} + \frac{d\bar{q}}{M - \bar{\eta}} \right) \quad (15)$$

将式(13)与式(15)代入式(11),可得塑性剪应变增量的表达式:

$$d\epsilon_s^p = \frac{l_p}{M\bar{p}} \left(d\bar{p} + \frac{d\bar{q}}{M - \bar{\eta}} \right) \quad (16)$$

在等 p 三轴压缩条件下, $d\rho=0$,此时, \bar{p} 为常数,因此,式(16)可简化为:

$$d\bar{\eta} = \frac{M(M - \bar{\eta})}{l_p} d\epsilon_s^p \quad (17)$$

式中, $\bar{\eta}$ 为平移应力空间中的应力比 $\bar{\eta} = \bar{q}/\bar{p}$,当采用普通应力表达时,可得 $\bar{\eta} = q/(p + \sigma_T)$ 。当达到临界状态时, $\bar{\eta} = M$ 。由此可推导出临界状态时的应力比 $\eta = q/p = M(1 + \sigma_T/p)$ 。通过平移变换应力的方式,在剑桥模型表达式中引入了三向抗拉强度,可以用于考虑土的黏聚强度的影响。根据式(17)能够得到不同 σ_T 条件下普通应力空间应力比 η 与塑性剪应变 ϵ_s^p 的关系曲线,如所图10示。随着 ϵ_s^p 的增加, η 逐渐增大并趋于稳定值 $M(1 + \sigma_T/p)$ 。随着 σ_T 的增大,曲线所能达到的最大应力比逐渐增大,可用于描述不同三向抗拉强度对土的应变硬化规律的影响。

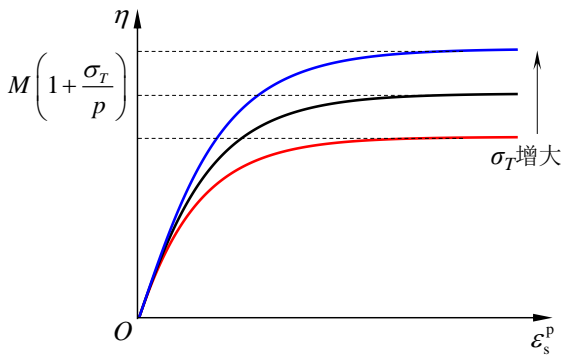


图10 ϵ_s^p - η 的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve of ϵ_s^p - η

2.2 冻土单轴本构关系的建立

根据1.2节中的试验结果可知,冻土的轴向应力 σ_1 随轴向应变 ϵ_1 的变化呈现典型的硬化/软化特征。为了能够合理描述这一应变硬化/软化变形规律以及冻土的黏聚强度特性,本研究借鉴了式(17)中的 $d\bar{\eta}-d\epsilon_s^p$ 关系,类比构建了冻土的单轴压缩

$d\sigma_1-d\epsilon_1$ 关系,即将式(17)中的 M 替换为 $\sigma_{1f} + \sigma_T$,将 $\bar{\eta}$ 替换为 $\sigma_1 + \sigma_T$,构建了冻土的单轴压缩应力-应变增量表达式:

$$d\sigma_1 = \frac{(\sigma_{1f} + \sigma_T)(\sigma_{1f} - \sigma_1)}{l_p} d\epsilon_1 \quad (18)$$

式中, $d\sigma_1$ 为应力增量, $d\epsilon_1$ 为应变增量, σ_{1f} 为潜在单轴抗压强度,其随应变发展而逐渐劣化。

冻土的应变软化特性主要原因在于提供冻土单轴抗压能力的内部微观结构随着应变发展而发生劣化^[27],为此,本研究提出了如下冻土潜在单轴抗压强度随应变发展而劣化的表达式:

$$\sigma_{1f} = (\sigma_{1fr} + \sigma_T - \sigma_{1z}) \exp \left[r \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_{1r}} \right)^2 \right] + \sigma_{1z} \quad (19)$$

式中, σ_{1fr} 为 ϵ_1 达到参考应变 ϵ_{1r} 时的参考潜在强度, σ_{1z} 为残余强度,即残余应力, r 为影响 σ_{1f} 退化速率的参数。当 $\epsilon_1 = \epsilon_{1r}$ 时, $\sigma_{1f} = \sigma_{1fr}$,基于此,可根据式(19)整理得:

$$r = \ln \frac{\sigma_{1fr} - \sigma_{1z}}{\sigma_{1fr} + \sigma_T - \sigma_{1z}} \quad (20)$$

冻土潜在单轴抗压强度 σ_{1f} 随应变 ϵ_1 增大而变化的规律如图11中红色虚线所示,可以看出 σ_{1f} 随着 ϵ_1 的增大而逐渐由初始减小,导致其从初始值 $\sigma_{1fr} + \sigma_T$ 逐渐减小到残余值 σ_{1z} 。相应地,冻土的 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 关系曲线如图11中黑色实线所示。在初始加载阶段,冻土应力-应变曲线处于应变硬化阶段,此时,当前 ϵ_1 对应的应力 σ_1 小于 σ_{1f} ;当应力状态达到 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲线与 $\sigma_{1f} - \epsilon_1$ 曲线的交点时, σ_1 达到最大;随着 ϵ_1 继续增大, $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲线开始表现出应变软化的特征,此时,当前应变对应的应力 σ_1 大于 σ_{1f} ;直至应变足够大时,二者趋于达到同一残余应力。

藉此,通过借鉴式(17),并引入平移应力概念,

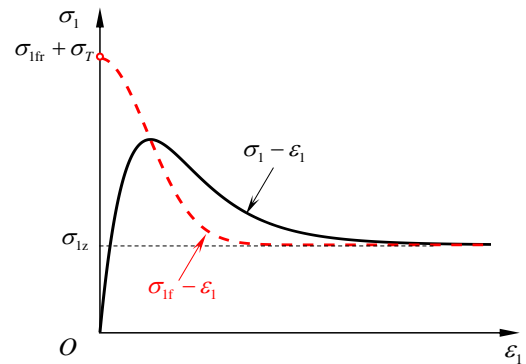


图11 σ_{1f} 随 ϵ_1 变化的规律

Fig. 11 The law of variation of σ_{1f} with ϵ_1

进一步构建冻土潜在抗压强度公式,从而在保留式(17)的简洁数学结构的同时,将原本适用于描述土的硬化行为的本构表达延伸至描述冻土的黏聚强度与硬化/软化特征的单轴力学行为。

为进一步分析与理解冻土单轴压缩本构关系的特性,本节设定 $\sigma_{1r}=7.05$ MPa, $\epsilon_{1r}=2.34\%$, $\sigma_{1z}=3.19$ MPa 和 $\sigma_T=4$ MPa 作为基本模型参数值,通过独立改变 l_p 的值,系统分析 l_p 对 $\sigma_1-\epsilon_1$ 关系曲线的影响,如图 12 所示。可以看出,当 $l_p=0.05$ 时,应力-应变曲线表现出高峰值应力与较小的峰值应变,且峰后软化行为显著的特征;而随着 l_p 的增大,应力-应变曲线的峰值应力逐渐减小,对应峰值应变逐渐变大,且峰后软化行为逐渐趋缓。由 l_p 值变化所得到的应力-应变曲线特征,与不同温度与应变率条件下的冻土单轴压缩应力-应变试验结果具有一定的相似性。鉴于此,可利用较小的 l_p 值捕捉低温与高应变率条件下的高峰值应力与强软化应力-应变行为,而利用较大的 l_p 值用于描述较高负温与低应变率条件下的低峰值应力与相对较弱的峰后软化行为。参数 l_p 可作为冻土单轴本构关系中作为关键变量,其取值变化能够综合表征温度 T 与应变率 $\dot{\epsilon}$ 对冻土力学响应的耦合影响。

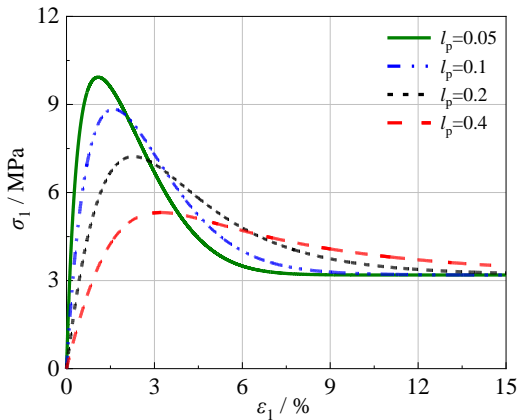


图 12 l_p 对 $\epsilon_1-\sigma_1$ 关系曲线的影响

Fig. 12 The effects of l_p on the $\epsilon_1-\sigma_1$ relationship curve

2.3 参数及其确定

所建立冻土单轴压缩本构关系共需 5 个具有明确物理含义的参数,包括 σ_{1r} , ϵ_{1r} , σ_{1z} , σ_T 和 l_p , 对应每个参数的确定方法如下:

参数 σ_{1r} 与 ϵ_{1r} 为参考潜在强度与参考应变。本文为了简便起见,取为冻土单轴应力应变关系的峰值应力与峰值应变,即 $\sigma_{1r}=\sigma_{1m}$, $\epsilon_{1r}=\epsilon_{1m}$, 对应参数值

可根据式(1)与式(3)确定。

参数 σ_{1z} 为残余应力,可根据式(5)确定。

参数 σ_T 为冻土的三向抗拉强度,基于已有研究可知 σ_T 与温度 T 之间呈单调变化规律。且已知在 $T=0^\circ\text{C}$ 时,砂土的三向抗拉强度为 0。因此,在本文研究的温度范围内采用线性关系进行确定,即 $\sigma_T=aT$, 式中, a 为温度效应系数。

参数 l_p 为用于表征温度和应变率对冻土单轴力学特性耦合影响的参数,本文假定其随 T 与 $\lg\dot{\epsilon}$ 线性变化,因此,建立如下表达式确定:

$$l_p = N \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_r}\right) T + l_{pr} \quad (21)$$

式中, N 为温度与应变率耦合效应系数, $\dot{\epsilon}_r$ 为参考应变率, l_{pr} 为 $T=0^\circ\text{C}$ 与 $\dot{\epsilon}=\dot{\epsilon}_r$ 时的 l_p 值。

3 模型试验验证

为了评估所建冻土单轴本构关系在描述冻土应力-应变规律方面的性能,本节对不同 T 与 $\dot{\epsilon}$ 条件下的冻土单轴压缩试验结果进行模型预测与对比。

根据试验数据整理得出,不同 $\dot{\epsilon}$ 条件下的峰值应力 σ_{1m} 随 T 升高呈幂函数增长趋势,同时,在恒定 T 下, σ_{1m} 随 $\dot{\epsilon}$ 增大也呈现增长趋势。基于式(2)拟合得到的 σ_{1m} 受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响的关系,并采用 2.3 节所述参数确定方法,即可得到 $\sigma_{1r}=\sigma_{1m}$ 。根据试验数据整理得出,不同 $\dot{\epsilon}$ 条件下的 ϵ_{1m} 与 $\dot{\epsilon}$ 呈显著相关性。基于式(4)拟合得到的 $\dot{\epsilon}$ 与 ϵ_{1m} 关系,并采用 2.3 节所述参数确定方法,即可求得 $\epsilon_{1r}=\epsilon_{1m}$ 。基于式(6)拟合可得到 σ_{1z} 其受 T 与 $\dot{\epsilon}$ 耦合影响。黏聚力 σ_T 与温度相关,根据经验所得线性关系 $\sigma_T=-0.4T$ 。在 3.2 节中分析参数 l_p 表现出明显的 T 与 $\dot{\epsilon}$ 相关性,由此拟合出的表达式 $l_p=0.004 \lg(\dot{\epsilon}/10^{-1.5})T+0.05$ 。所用模型参数列于表 2。

在图 13 中,基于四种温度 ($T=-5^\circ\text{C}$, -10°C ,

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

参数	取值
σ_{1r}	$5.01(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)0.093(T/T_0)^{0.61}$
ϵ_{1r}	$0.02\exp(-\dot{\epsilon}/10^{-4.72})+0.012$
σ_{1z}	$0.152\lg(\dot{\epsilon}/10^{-3.6})(T+7.7)+2.7$
σ_T	$-0.4T$
l_p	$0.004\lg(\dot{\epsilon}/10^{-1.5})T+0.05$

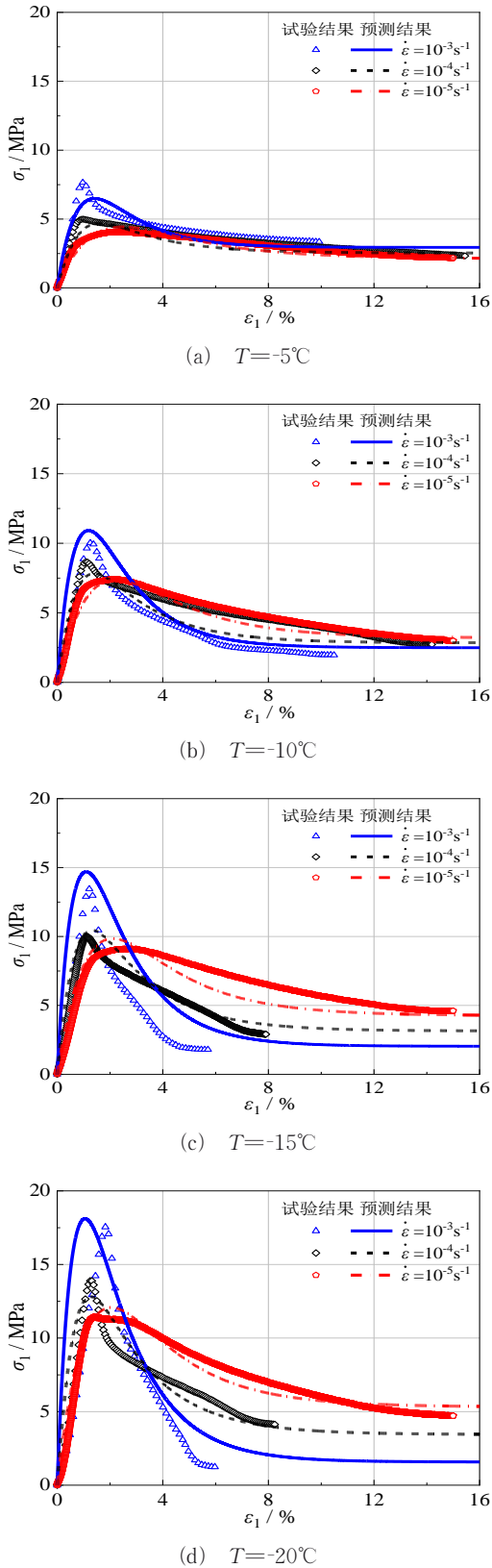


图 13 冻结砂土的试验结果与预测结果对比
Fig. 13 Comparison of test results and predicted results for frozen soils

-15°C , -20°C)与三种应变率($\dot{\epsilon}=10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 10^{-4} s^{-1} , 10^{-5} s^{-1})的单轴压缩试验结果与模型预测结果的对比表明:所提出的单轴本构关系可准确表征冻土力学行为的温度与应变率耦合效应。力学参数预测层面,模型复现峰值应力的双因素强化规律,随温度降低(从 -5°C 到 -20°C)与应变率升高(从 10^{-5} s^{-1} 到 10^{-3} s^{-1})呈非线性增长,同时,合理捕捉峰值应变与应变率的相关性。模型合理残余应力的非单调耦合响应:在 -5°C 时准确预测残余应力随应变率增大而增大,而在 -10°C 、 -15°C 、 -20°C 时随应变率增大而降低的趋势。应力-应变关系层面,模型合理描述脆性延性的转换。在较低应变率与较高低温情况下($10^{-5}\text{ s}^{-1}/-5^{\circ}\text{C}$),试验与预测曲线峰后段均呈渐进软化型延性变形,残余段平缓下降;在高应变率低温情况下($10^{-3}\text{ s}^{-1}/-20^{\circ}\text{C}$),则均表现为峰后应力骤降型脆性变形,残余段陡峭衰减。模型预测与试验结果比较表明,所提出的单轴本构关系能有效地表征温度与应变率耦合影响的冻土力学特性。

4 结论

本文选取厦门 ISO 标准砂(中级砂),通过试验与理论建模研究了温度与应变率对冻结砂土单轴力学特性的影响,主要结论如下:

1) 在试验研究中,冻土的峰值应力、峰值应变及残余应力受温度与应变率影响显著。温度与应变率耦合影响冻土的单轴抗压峰值应力,低温与高应变率显著提升冻土峰值应力;峰值应变受应变率影响更为显著;同时,温度与应变率对残余应力的耦合影响体现更为显著,低应变率条件下随温度降低而增大,高应变率下则表现为随温度增大而降低的趋势。系统开展的冻土单轴压缩试验为合理建立单轴本构关系提供了有力的数据支撑。

2) 在理论研究中,借鉴剑桥模型能够通过简单数学形式描述黏土应变硬化规律的优势,采用平移变换应力的方式将三向抗拉强度 σ_T 引入模型框架,有效反映了冻土的黏聚效应;进一步,通过建立冻土潜在单轴抗压强度的应变劣化函数,描述单轴压缩条件下冻土的内部微观结构随着应变发展而发生劣化的规律,实现了对冻土单轴压缩力学响应的合理刻画。模型包含 5 个具有明确物理含义的参数,并给行了合理的参数确定方法。模型试验验证

表明,所建立本构关系能够有效反映温度与应变率耦合影响的冻土单轴压缩力学行为,可为冻土相关的工程设计与分析提供理论分析依据。

参考文献:

- [1] Zheng Hao, Yang Ning yu, Si Jun ling, et al. Influence of ice skeleton on the mechanical behavior of frozen soil under uniaxial compression[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 228: 104327.
- [2] Zhao Jun lin, Zhang Pei, Yang Xiao, et al. On the uniaxial compression strength of frozen gravelly soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 171: 102965.
- [3] Li Hai peng, Zhu Yuan lin, Zhang Jun bing, et al. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 39(1): 39-45.
- [4] 张俊兵,李海鹏,林传年,等. 饱和冻结粉土在常应变率下的单轴抗压强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(S2): 2865-2870.
Zhang J B, Li H P, Lin CH N, et al. Compressive strength of saturated frozen silt under constant strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(S2): 2865-2870.(in Chinese)
- [5] 李海鹏,林传年,张俊兵,等. 饱和冻结黏土在常应变率下的单轴抗压强度[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 105-109.
Li H P, Lin CH N, Zhang J B, et al. Uniaxial compressive strength of saturated frozen clay at constant strain rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 105-109.(in Chinese)
- [6] Liu Qin long, Wu Yong kang, Liu Li, et al. Unconfined Compressive Strength (UCS) of frozen soil: A model considering temperature, moisture, and strain rate[J]. Cold Regions Science and Technology, 2025, 239: 104545.
- [7] Lai Yuan ming, Xu Xiang tian, Dong Yuan hong, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6-18.
- [8] NaderGirgis, Li Biao, SohailAkhtar, et al. Experimental study of rate-dependent uniaxial compressive behaviors of two artificial frozen sandy clay soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 180: 103166.
- [9] Xu Xiang tian, Wang Yu bing, Yin Zhen hua, 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: 44-51.
- [10] 罗飞,何俊霖,朱占元,等. 寒区冻结冰碛土的变形特性与非线性本构模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(05): 801-808.
Fei L, He J L, Zhu ZH Y, et al. Study on deformation characteristics and nonlinear constitutive model of frozen moraine soil in cold region[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(05): 801-808.(in Chinese)
- [11] Vialov S-S, Gmshinskii V-G, Gorodetskii S-E, et al. The strength and creep of frozen soil and calculations for ice-soil relating structure[M]. 1965.
- [12] Fei Wen ping, Yang Zhao hui Joey. Modeling unconfined compression behavior of frozen Fairbanks silt considering effects of temperature, strain rate and dry density[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 252-263.
- [13] RobertoCudmani, Yan Wei, UlrichSchindler. A constitutive model for the simulation of temperature-, stress- and rate-dependent behaviour of frozen granular soils[J]. Geotechnique, 2022, 73(12): 1043-1055.
- [14] 蔡聪,马巍,赵淑萍,等. 冻结黄土的单轴试验及其本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(05): 879-887.
Cai C, Ma W, Zhao SH P, et al. Uniaxial tests on frozen loess and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(05): 879-887. (in Chinese)
- [15] Liu Bo, He Yan qing, Han Yan hui, et al. A nonlinear elastic-strain hardening model for frozen improved sandy soil under uniaxial compression loading condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 222: 104205.
- [16] Zhu Zhi wu, Kang Guo zheng, Ma Yue, et al. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading [J]. Mechanics of Materials, 2016, 102: 108-116.
- [17] Zhu Zhi wu, Jia Jin xuan, Zhang Fu lai. A damage and elastic-viscoplastic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading and its numerical implementation [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 175: 103081.
- [18] 路德春,陈力伟,周鑫,等. 黏土岩的三维非正交弹塑性本构模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(05): 1005-1013.
Lu D CH, Chen L W, Zhou X, et al. A three-dimen-

- sional non-orthogonal elastoplastic constitutive model for claystone [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(05): 1005-1013.(in Chinese)
- [19] 罗会武,刘恩龙. 饱和土在单向冻结过程中的水-热-力耦合分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(04): 586-592.
- Luo H W, Liu E L. Hydro-thermo-mechanical coupling analysis of saturated soils during the process of freezing in uni-direction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(04): 586-592.(in Chinese)
- [20] 任建喜,刘政,谷禹,等. 三轴压缩冻融裂隙砂岩疲劳破坏机理与本构模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(03): 680-687.
- Ren J X, Liu ZH, Gu Y, et al. Study on fatigue failure mechanisms and constitutive model of freeze-thaw fractured sandstone under triaxial compression [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(03): 680-687.(in Chinese)
- [21] 王丹,王国富,路林海,等. 基于不同本构模型黄河厚冲积层基坑开挖结构变形分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(06): 936-942.
- Wang D, Wang G F, Lu L H, et al. Study on structural deformation of pit in thick alluvial clay based on different constitutive models [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(06): 936-942.(in Chinese)
- [22] 路德春,张君鸿,梁靖宇,等. 基于特征滑动面的横观各向同性土强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2000-2008.
- Lu D CH, Zhang J H, Liang J Y, et al. Strength properties of transversely isotropic soils based on characteristic mobilized plane [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2000-2008.(in Chinese)
- [23] 梁靖宇,沈万涛,路德春,等. 考虑沉积角影响的冻结砂土单轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1065-1074.
- Liang J Y, Shen W T, Lu D CH, et al. Uniaxial compression test of frozen sand considering the effect of the deposition angle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1065-1074.(in Chinese)
- [24] Li Hong sheng, Yang Hai tian, Chang Cheng, et al. Experimental Investigation on Compressive Strength of Frozen Soil versus Strain Rate [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2001, 15(2): 125-133.
- [25] 孙德安,姚仰平,殷宗泽. 初始应力各向异性土的弹塑性模型[J]. 岩土力学. 2000(03): 222-226.
- Sun D A, Yao Y P, Yin Z Z. An elasto-plastic model for soil with initially stress-induced anisotropy [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000(03): 222-226.(in Chinese)
- [26] 李海潮,李涛,童晨曦,等. 适用于黏土和砂土的亚塑性剑桥模型[J]. 岩石力学与工程学报. 2024, 43(12): 3096-3107.
- Li H CH, Li T, Tong CH X, et al. Hypoplastic cam-clay model for clay and sand soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 3096-3107.(in Chinese)
- [27] 杨玉贵,赖远明,蒲毅彬,等. 高含冰量冻结粉土单轴受压损伤特性试验分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3063-3068.
- Yang Y G, Lai Y M, Pu Y B, et al. Experimental analysis of damage of ice-rich frozen silt under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3063-3068.(in Chinese)