

胡治强,崔宏环,张松,等.低温状态下冻土-浆脉结合界面的力学特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):59-65.  
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250363

HU Zhiqiang, CUI Honghuan, ZHANG Song, et al. Mechanical characteristics of frozen soil-grout interface at low temperature[J].  
Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 59-65. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250363

## 低温状态下冻土-浆脉结合界面的力学特性

胡治强<sup>1</sup>, 崔宏环<sup>1,2\*</sup>, 张松<sup>1</sup>, 张庆武<sup>3</sup>, 徐维江<sup>1</sup>, 王雨豪<sup>1</sup>

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3. 开滦建设(集团)有限责任公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 针对高富水地层人工冻结法施工中冻土-浆脉界面破坏力学特性不明确的问题, 采用巴西劈裂试验结合数字图像相关技术(DIC), 对冻土-浆脉结合试样开展试验, 分析不同初始含水率与冻结负温对界面力学性能及断裂演化机制的影响。研究表明: 不同初始含水率试件的界面裂纹扩展模式差异显著且萌生具有非同步性; 初始含水率减小使浆脉有效提升冻土强度, 破坏路径从脆性向韧性转变; 试样损伤过程分为累积阶段和快速阶段, 初始含水率升高时, 损伤累积阶段持续时间及损伤加速点 $D_f$ 的大小与出现时间均呈现先增大后减小的规律。研究结论为地下工程的冻结法应用提供技术支持。

**关键词:** 冻土-浆脉界面; 低温状态; 巴西劈裂; 数字图像技术; 力学性能; 含水率

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0059-07

## Mechanical characteristics of frozen soil-grout interface at low temperature

HU Zhiqiang<sup>1</sup>, CUI Honghuan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Song<sup>1</sup>, ZHANG Qingwu<sup>3</sup>, XU Weijiang<sup>1</sup>, WANG Yuhao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 2. Hebei Province Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Renovation, and Disaster Resistance, Zhangjiakou 075000, China; 3. Kailuan Construction (Group) Company Limited, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of unclear mechanical properties of frozen soil-pulp vein interface failure in the construction of artificial freezing method in high water-rich strata, Brazilian splitting test combined with digital image correlation technology (DIC) was used to test the frozen soil-pulp vein combined specimens, and the effects of different initial water content and freezing negative temperature on the mechanical properties and fracture evolution mechanism of the interface were analyzed. The results show that the interface crack propagation modes of specimens with different initial water contents are significantly different and the initiation is non-synchronous. The decrease of initial water content makes the slurry vein effectively improve the strength of frozen soil, and the failure path changes from brittleness to toughness. The damage process of the specimens is divided into the accumulation stage and the rapid stage. When the initial water content increases, the duration of the damage accumulation stage and the size and occurrence time of the damage acceleration point  $D_f$  increase first and then decrease. The research conclusions provide technical support for the application of freezing method in underground engineering.

**Keywords:** frozen soil-grout interface; low temperature state; Brazilian split; digital image technology; mechanical properties; water contents

## 0 引言

在水电工程建设中, 存在着大量软岩、软土

工程, 这类工程通常采用人工冻结技术进行加固<sup>[1-3]</sup>。但由于此类工程的软土地层中存在大量裂隙和空洞, 难以直接冻结, 在冻结施工前需预先

收稿日期: 2025-08-18 修回日期: 2025-11-05 接受日期: 2025-11-13 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52172347); 河北省高等学校科学研究项目(QN2025241); 河北建筑工程学院创新基金项目(XY2026053)

作者简介: 胡治强(1998-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事冻土加固技术方面的研究。E-mail: 2671190748@qq.com

通信作者: 崔宏环(1974-), 女, 河北张家口, 博士, 教授, 主要从事特殊地基处理方面的研究。E-mail: chh1496@hebiace.edu.cn

进行注浆处理。

目前,“冻-注结合”的加固方法已广泛应用于地下工程<sup>[4-5]</sup>。POTYONDY<sup>[6]</sup>分析了法向压力、周围土体性质及含水率对永久冻土与建筑结构接触面力学特性的影响。PAN等<sup>[7]</sup>探讨了冻土中土体-结构接触面抗剪强度对结构基础承载力及长期稳定性的影响机制。LIU等<sup>[8]</sup>研究了压力、温度及含水率对冻土-混凝土界面力学特性的影响,并解释了接触面峰值与残余剪切强度的变化规律。孙厚超等<sup>[9]</sup>构建冻土与特定结构物界面层的力学试验系统,复现了界面层的力学变形行为。GAO等<sup>[10]</sup>研究了渗流速度与温度梯度对黏土砂层中冰空间分布的影响,据此建立描述该冻结过程的理论模型。韩昀希等<sup>[11]</sup>研究了高流速卵石地层中地铁联络通道的人工冻结温度场,通过分析地层温度场与泄压孔压力的发展规律,揭示了冻结帷幕的交圈特征,进而确定了冻结壁的薄弱位置。丁靖康等<sup>[12]</sup>研究表明,冻土与地基之间冰的黏附作用形成了抗拉黏冻强度,其数值受含水量、温度、加载时间、地基材料及表面粗糙度等多种因素影响。SUN等<sup>[13]</sup>通过对冻结粉土与混凝土界面开展正交直剪试验与拉伸试验,研究了含水率、温度及干密度对界面剪切与抗拉强度的影响规律,提出冻结条件下锥形桩-土相互作用的力学计算模型。数字图像相关法(DIC)作为一种高精度全场变形测量技术,为深入揭示界面力学行为及其影响机制提供了新途径<sup>[14]</sup>。相较于传统方法,DIC可通过采集物体表面变形过程中的散斑图像,实现位移与应变场的非接触式可视化测量,克服了接触式测量的局限性。学者将DIC技术应用于冻土的单轴压缩与三轴剪切试验,成功揭示了冻土内部变形演化规律及破坏模式<sup>[15-16]</sup>。然而,针对冻土-浆脉这一特殊结构界面,基于DIC技术在受力过程中的变形协调机制、损伤萌生与扩展路径等关键问题的系统性研究仍较为缺乏。

因此,本文以冻土-浆脉为研究对象,进行预注浆并实施巴西劈裂试验,利用DIC技术监测其应变演化,分析界面的结合特性与试样的破坏过程,引入基于应变构建的损伤因子来表征其损伤行为。

## 1 试验方案

### 1.1 试验原理与设备

针对冻土-浆脉结合体界面力学特性研究的特殊性,采用圆柱状试样开展巴西劈裂试验,能够

更高效、可靠地揭示界面在拉应力作用下的破坏机理与强度发展规律<sup>[17]</sup>。基于此,采用该方法测定冻土-浆脉界面的抗拉强度。

巴西劈裂强度为

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL}, \quad (1)$$

式中: $P$ 为冻土-浆脉试样失效时的峰值力; $D$ 为冻土-浆脉试样直径; $L$ 为冻土-浆脉试样厚度。

试验装置由加载系统、监测系统和分析系统组成。加载系统采用万能液压机,加载速率为0.05 mm/s,行程的门限值为10 mm;图像监测系统采用GS3-U3-91s6m高速摄影机,以每秒5帧的采样频率对试件图像进行采集与存储;分析系统用于分析试样加载破坏过程中的位移、应变等相关数据。试验设备及冻土-浆脉试样见图1。

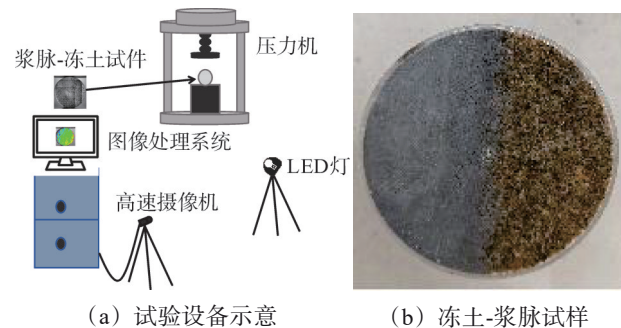


图1 试验设备及试样

Fig.1 test equipment and specimen

### 1.2 试样制备

试验所用砂土试样采自广东省广州市某地铁隧道冻结工程现场。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)开展筛分试验,颗粒级配曲线见图2,其中 $d_n$ 表示小于该粒径的土颗粒质量占总土样质量 $n\%$ 时对应的粒径。经计算,该土样的不均匀系数 $C_u$ 为1.53,曲率系数 $C_c$ 为1.21。综合判定,该土样土粒均匀,级配不良。

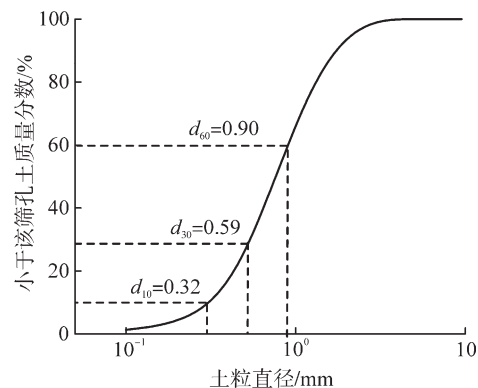


图2 砂土颗粒级配曲线

Fig.2 soil particle gradation curve

为模拟预注浆-人工冻结联合加固法施工中冻土与浆脉接触面的力学性能, 采用先浇筑后冻结的方法制备冻结砂土与水泥浆脉的复合试样。试样为直径 77 mm、高度 40 mm 的圆柱体, 其中冻结砂土与水泥浆脉均为半圆柱体, 其半径为 38.5 mm。

试验流程见图 3。首先, 将现场土样在 105 °C 下烘干, 冷却后按试验方案配制至特定含水率(质量分数), 密封养护 24 h。随后, 将砂土装入模具, 装填体积略大于设计标准以备压实。最后, 调配水灰质量比为 1:1 的水泥浆, 并将其缓慢浇筑于模具的另一半, 以形成完整的复合试样。试样制作完成后在常温环境下养护 7 d。养护结束后, 根据试验设计的温度条件, 将试样置于高低温箱中制冷不少于 24 h, 待试样完全冻结并达到要求后拆模。在试样底面制作散斑, 用保鲜膜包裹试样, 置于控温冰箱中保存待用。对不同初始含水率和不同冻结负温条件开展系列研究, 相关试验工况见表 1。

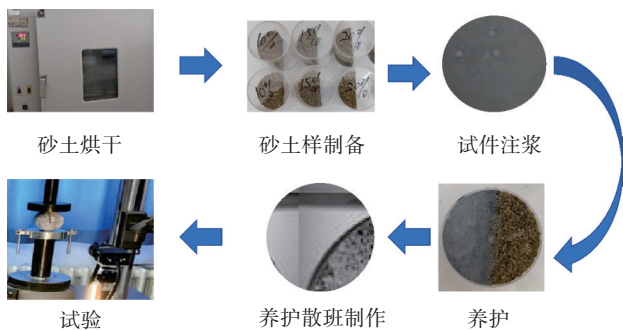


图 3 试验流程

Fig.3 test flow

表 1 试验工况

Tab.1 test conditions

试验工况	初始含水率/%	试件密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	冻结负温/°C	相对密度
1	10	1.93	-5	2.73
2	15	1.85	-10	2.73
3	20	1.78	-15	2.73
4	25	1.70	-20	2.73

## 2 冻土-浆脉力学性能

### 2.1 预注浆对冻土抗拉强度的影响

-10 °C 条件下, 不同初始含水率冻土试样的抗拉强度峰值见图 4。

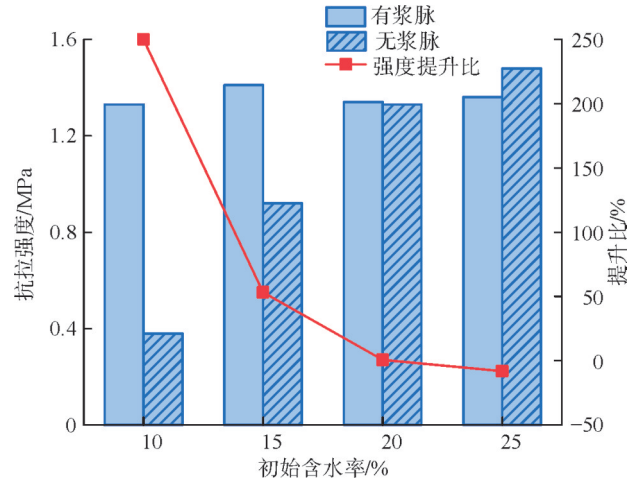


图 4 -10 °C 下注浆前后冻土试样抗拉强度峰值

Fig.4 peak tensile strength of frozen soil specimens before and after grouting at -10 °C

由图 4 可见, 随着初始含水率的升高, 纯冻土试样的抗拉强度逐渐增大, 但增幅渐缓; 冻土-浆脉试样的抗拉强度分别提升了 250.00%、53.30%、0.75% 和 -8.11%。这是因为: 当初始含水率较低时, 水泥浆脉替代了冰结构, 成为界面结合的主要部分, 浆脉自身所含水分改善了界面处的含水状况, 其水泥材料的黏聚性能也取代了原界面的黏聚性能, 提升了冻土的抗拉强度; 当初始含水率较高时, 浆脉与土颗粒间的胶结作用较弱, 界面承载力主要来源于冰胶结力和土颗粒间的胶结作用<sup>[18]</sup>, 浆脉对强度的提升效果不显著。

预注浆对冻土抗拉强度的提升比率在初始含水率 10% 时, 而初始含水率为 15% 时, 绝对提升效果最佳。

### 2.2 冻结负温对冻土-浆脉抗拉强度的影响

对冻土-浆脉试样开展巴西劈裂试验, 得到不同冻结负温与初始含水率条件下界面的载荷-位移变化曲线, 见图 5。由图 5 可知, 随着冻结负温降低, 不同初始含水率试样的峰值载荷显著增大, 而破坏位移则呈递减趋势。基于巴西劈裂试验测得的界面峰值载荷, 根据式 (1) 可得试样的峰值抗拉强度。为分析抗拉强度  $\sigma$  随环境温度  $T$  的变化规律, 采用二次多项式对 -5 °C 至 -20 °C 范围内冻土-浆脉试样的平均抗拉强度与温度关系进行拟合, 结果见图 6。各拟合式的拟合优度系数  $R^2$  均大于 0.95, 表明该预测模型具有较高的可靠性。

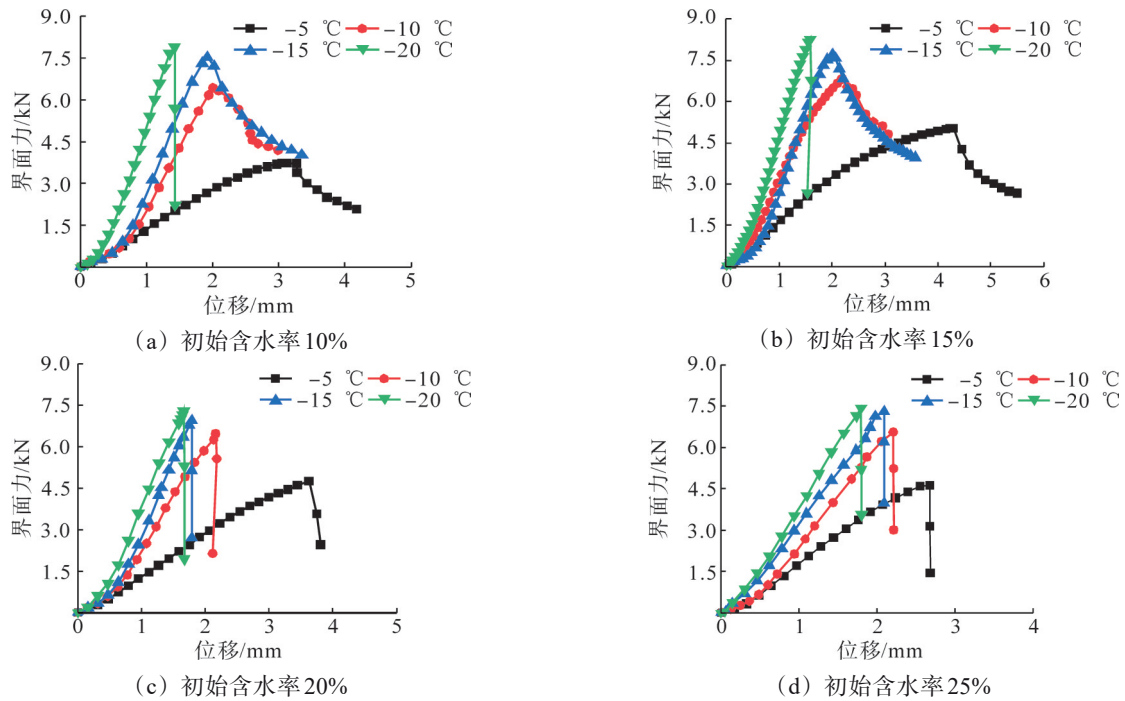


图5 不同初始含水率下冻土-浆脉界面力与位移

Fig.5 force and displacement of frozen soil-pulp interface under different initial water contents

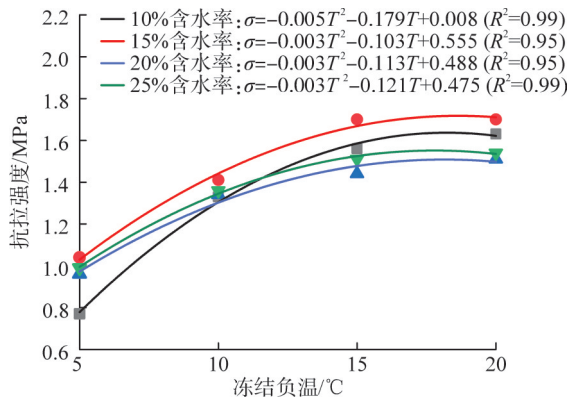


图6 抗拉强度与冻结负温关系

Fig.6 relationship between tensile strength and freezing negative temperature

研究进一步表明,在恒定加载速率下,温度对冻土-浆脉试样的抗拉强度影响显著。随冻结负温降低,试样峰值强度呈单调递增趋势。这是由于温度下降促使土中孔隙水冻结成冰,显著增强了土颗粒之间及土颗粒与浆脉界面之间的胶结作用。此过程中,冰胶结效应占据主导地位,提升了土体抵抗外部载荷的能力。

### 3 冻土-浆脉试样抗拉特性

#### 3.1 宏观破坏特性

基于DIC技术获得的4组冻土-浆脉试样水平应变演化过程可分为压密阶段、弹性阶段、塑性

阶段、峰值时刻和峰后阶段<sup>[9]</sup>,各阶段对应特征点分别标记为a、b、c、d和e,见图7。不同含水率下冻土-浆脉试样的应力见图8。

由图8可见,当初始含水率为10%和15%时,试样表现为韧性破坏,其应力-时间曲线特征相似:加载初期为压密阶段,应力曲线呈非线性上凹形;随着载荷增加,试样内部微孔隙与冰晶体被逐渐压密,进入线弹性阶段,曲线近似为直线;载荷接近峰值时水平应变开始集中,达到峰值后试样迅速开裂,曲线急剧下降,但劈裂过程并未立即终止,试样仍具一定残余强度,裂缝跨度持续增大,周边应变集中区快速扩展。而在初始含水率为20%和25%时,试样表现为脆性破坏,其压密阶段明显短于低含水率试样,因微孔隙多已被冰晶体填充;载荷增大后试样进入线弹性阶段,水平应变场逐渐明显,峰值载荷时试样突然开裂,应力骤降,圆盘径向出现贯通裂缝,无残余强度,径向应变急剧增大。

不同含水率下试样破坏形态见图9。不同初始含水率条件下,试样的裂纹扩展规律与变形破坏特征存在显著差异。随着初始含水率升高,冻土-浆脉试样的破坏模式由以裂隙缓慢扩展为特征的韧性破坏,逐渐转变为以裂隙快速贯通为特征的脆性破坏,且贯通裂缝位置逐渐靠近冻土-浆脉界面。说明在低含水率条件下,浆脉的存在有助于

增强冻土的韧性。所有试样在塑性阶段均出现应变集中区, 但低含水率试样中该区域的形成时间

相对延后, 进一步印证了浆脉在低含水率下对冻土韧性的提升作用。

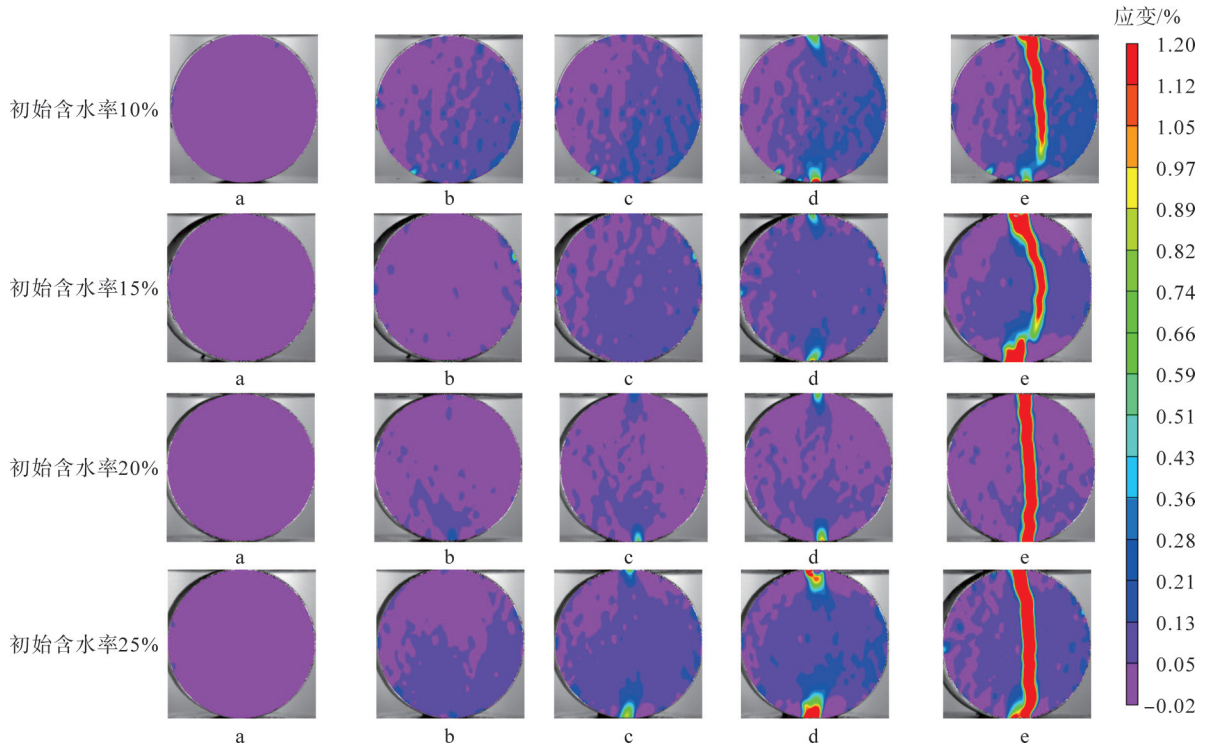


图 7 基于DIC冻土-浆脉试样水平应变演化

Fig.7 horizontal strain evolution of frozen soil-grout vein specimens based on DIC

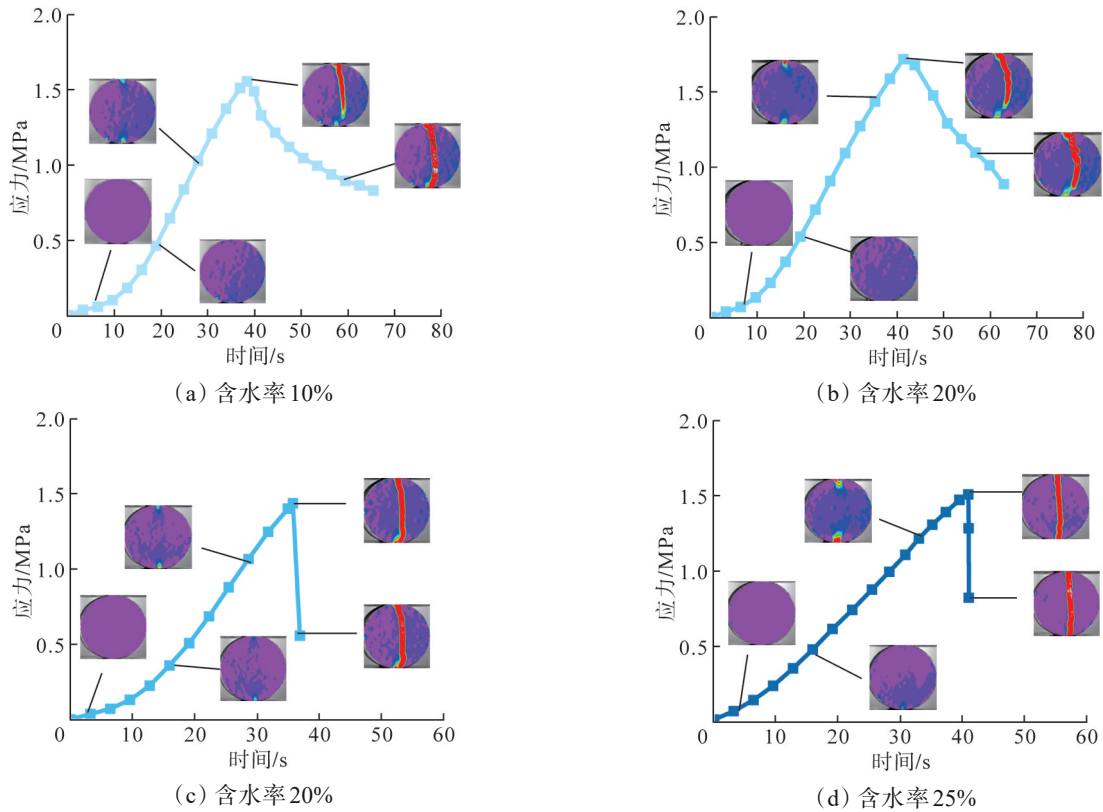


图 8 基于DIC不同含水率下冻土-浆脉试样的应力

Fig.8 stress of frozen soil-grout vein specimens with different water content based on DIC

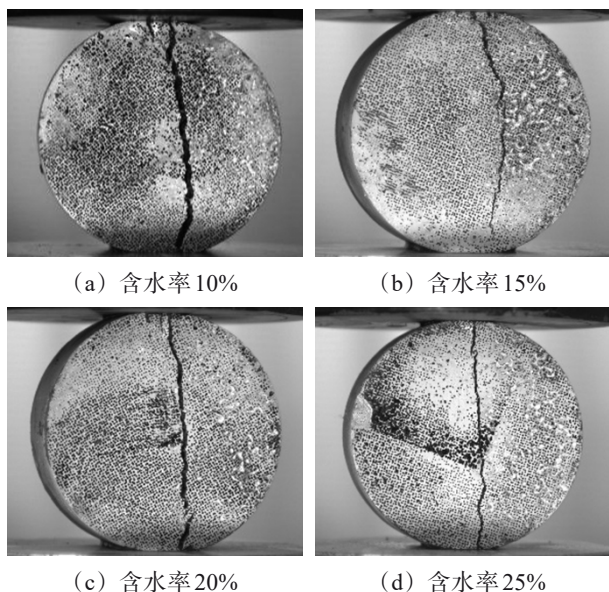


图9 不同初始含水率下冻土-浆脉试样界面破坏形态  
Fig.9 interface failure of frozen soil-grout specimens under different initial water contents

### 3.2 冻土-浆脉试样界面损伤评价

DIC所获取的应变为局部数据,难以直接用于表征材料的整体损伤状态<sup>[20-21]</sup>。为此,引入损伤因子 $D_f$ 以更直观地量化损伤演化<sup>[22]</sup>。根据张皓<sup>[23]</sup>的试验研究,采用试样水平方向应变数据中前5%至10%的高值应变区域评估损伤过程。

$$D_f = \frac{\bar{\varepsilon}_x}{\bar{\varepsilon}_{x,\max}}, \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\varepsilon_x)_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_x)_i, \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: $\bar{\varepsilon}_x$ 为水平应变偏差; $\bar{\varepsilon}_{x,\max}$ 为 $\bar{\varepsilon}_x$ 的最大值,即临界破坏时的 $\bar{\varepsilon}_x$ ; $(\varepsilon_x)_i$ 为第*i*个测点的水平应变; $N$ 为实际测点数量; $M=0.1N$ 。

为定量表征冻土-浆脉试样的损伤演化过程,选取200个较大应变测点,计算得到不同初始含水率条件下试样的损伤因子 $D_f$ ,其变化规律见图10。

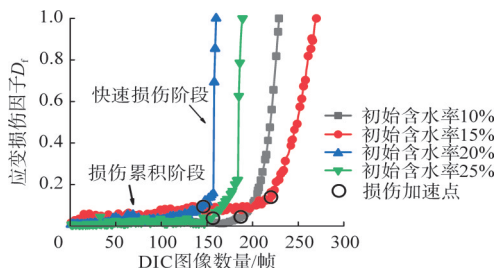


图10 破坏前应变损伤因子 $D_f$ 的变化

Fig.10 variation of strain damage factor  $D_f$  before failure

图10中横坐标代表试样在达到峰值抗拉强度前所分析的散斑图像数量。根据曲线特征,试样

的损伤过程可分为损伤累积和快速损伤两个阶段。在两阶段载荷之间存在一个损伤加速点,具体见表2。

表2 不同初始含水率下材料的损伤加速点特征  
Tab.2 characteristics of damage acceleration point of materials under different initial water contents

初始含水率/%	损伤加速点出现时间/s	损伤加速点 $D_f$
10	37.6	0.045
15	44.2	0.140
20	29.2	0.099
25	30.3	0.051

由图10可知,在损伤累积阶段,试样的应变损伤因子小幅波动,整体损伤程度较低;进入快速损伤阶段后,损伤因子则呈线性快速上升趋势。随着初始含水率的升高,损伤累积阶段的持续时间呈现先延长后缩短的趋势,损伤加速点对应的 $D_f$ 也先增大后减小。同时,损伤加速点的出现时间随含水率增大而提前,即呈现“先慢后快”的特征。当试样初始含水率高于20%,越过损伤加速点后,损伤因子急剧增大,表明基于水平应变定义的损伤因子能够有效表征冻土-浆脉试样的损伤演化过程。

由表2可知,含水率从10%增加至15%时,试件由脆性向延性转变,具体表现为损伤加速点显著推迟,同时对应的 $D_f$ 大幅提升,抗劈裂能力达到最强。与之相反,当含水率升至20%~25%时,试件性能迅速向脆性回归,损伤加速点提前且 $D_f$ 减小,呈现典型的“高水脆化”规律。由此判断,含水率为15%时抗劈裂性能最佳。

## 4 结论

(1) 基于“先注浆后冻结”工艺制备的冻土-浆脉试样,浆脉对冻土抗拉强度的增强效应,随初始含水率的增加呈先增强后减弱的非线性规律。当初始含水率大于25%时,不建议采用此加固方法。

(2) 随冻结负温降低,冻土-浆脉试样的抗拉强度逐渐升高,破坏模式由韧性向显著脆性转变。这主要是由于温度越低,冰的胶结作用越强,材料脆性也越显著。

(3) 随初始含水率降低,浆脉的存在使冻土强度表现出由脆性破坏向韧性破坏转变的趋势。当初始含水率为15%时,试样抗拉强度达到峰值,浆脉的胶结效应最为理想。

(4) 基于水平应变构建的损伤程度因子 $D_f$ ,能有效表征冻土-浆脉在受拉作用下的损伤演化过程。随初始含水率升高,损伤累积阶段的持续时

间、损伤加速点对应的 $D_f$ 值及其出现时间,均呈现先增大后减小的规律;当含水率高于20%时,试样在达到损伤加速点后,损伤因子会急剧增大。

### 参考文献(References):

- [1] ALZOUBI M A, ZUETER A, NIE-ROUQUETTE A, et al. Freezing on demand: a new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(4): 621-627.
- [2] PHILLIPS M, FADHEL H, RAAFAT I, et al. Use of artificial ground freezing in construction of cross passages under Suez Canal [J]. Geomechanics and Tunneling, 2021, 14(3): 298-307.
- [3] ZHANG S, YUE Z R, LU X Z, et al. Model test and numerical simulation of foundation pit constructions using the combined artificial ground freezing method[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 205: 103700.
- [4] 金修伟,鹿庆蕊,李栋伟,等.注浆-冻结联合工法加固地铁隧道地表融沉特性研究[J].冰川冻土,2024,46(4):1440-1452.  
JIN Xiuwei, LU Qingrui, LI Dongwei, et al. Study on the characteristics of surface thaw settlement of subway tunnel reinforced by grouting-freezing combined construction method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(4): 1440-1452.
- [5] ZHANG S, SUN T C, ZHOU X M, et al. Experimental investigation of ice-frozen sand interface and the effect of ice structure on frozen soil specimens[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(7): 354.
- [6] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [7] PAN R K, YANG P, YANG Z H. Experimental study on the shear behavior of frozen cemented sand-structure interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 197: 103516.
- [8] LIU J K, LV P, CUI Y H, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104/105: 1-6.
- [9] 孙厚超,杨平,王国良.冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J].岩土力学,2014,35(12):3636-3641,3643.  
SUN Houchao, YANG Ping, WANG Guoliang. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3636-3641, 3643.
- [10] GAO G Y, GUO W, REN Y X. Coupled modelling of artificial freezing along clay-sand interface under seepage flow conditions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 211: 103865.
- [11] 韩昀希,冯利华,任全军,等.高流速卵石地层地铁联络通道人工冻结温度场研究[J].科学技术与工程,2024,24(12):5134-5142.  
HAN Yunxi, FENG Lihua, REN Quanjun, et al. Subway cross passage artificial freezing temperature field in pebble stratum with high velocity flow[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5134-5142.
- [12] 丁靖康,韩龙武,李永强,等.青藏铁路多年冻土工程特性与冻土工程[J].铁道工程学报,2005,22(增刊1):327-332.  
DING Jingkang, HAN Longwu, LI Yongqiang, et al. Engineering characteristics of permafrost and frozen soil engineering in Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22 (Suppl.1): 327-332.
- [13] SUN T C, GAO X J, LIAO Y M, et al. Experimental study on adfreezing strength at the interface between silt and concrete[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 190: 103346.
- [14] LIAN H H, SUN X J, YU Z P, et al. Research on the fracture mechanical performance of basalt fiber nano-CaCO<sub>3</sub> concrete based on DIC technology[J]. Construction and Building Materials, 2022, 329: 127193.
- [15] 王青原,许颖,钱胜.基于机器视觉和数字图像相关技术的混凝土损伤演化研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(11):169-180.  
WANG Qingyuan, XU Ying, QIAN Sheng. Study on damage evolution of concrete specimens based on machine vision and digital image correlation technology[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(11): 169-180.
- [16] GUO T F, LIU K W, WANG H Q, et al. Mechanical characteristics and fracturing behavior of rock-concrete composite specimens with two pre-existing parallel flaws under uniaxial compression based on AE and DIC systems[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 136: 104866.
- [17] 肖忠华.上海软土二次冻融土工程性质试验研究[D].上海:同济大学,2007:32-34.
- [18] 吉延峻,贾昆,俞祁浩,等.现浇混凝土-冻土接触面冻结强度直剪试验研究[J].冰川冻土,2017,39(1):86-91.  
JI Yanjun, JIA Kun, YU Qihao, et al. Direct shear tests of freezing strength at the interface between cast-in-situ concrete and frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 86-91.
- [19] JIANG W T, LAI Y M, YU F, et al. Mechanical properties investigation and damage constitutive models of red sandstone subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 207: 103776.
- [20] 亓宪寅,柯婷,耿殿栋.基于压电陶瓷和DIC的软硬互层岩石内外损伤试验及模型研究[J].煤矿安全,2023,54(9):119-128.  
QI Xianyin, KE Ting, GENG Diandong. Damage test and model study of soft and hard interbedded rock based on piezoelectric ceramics and DIC[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(9): 119-128.
- [21] 张立群,徐维江,张松,等.人工冻结工程中浆脉-冻土界面力学特性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):720-727.  
ZHANG Liqun, XU Weijiang, ZHANG Song, et al. Study on the mechanical properties of the interface between slurry vein and frozen soil in artificial ground freezing[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(6):720-727.
- [22] 都海龙,金爱兵,秦文静,等.单轴压缩下水泥注浆煤岩力学性能及损伤特征研究[J].岩土力学,2025,46(5):1521-1533.  
DU Hailong, JIN Aibing, QIN Wenjing, et al. Mechanical properties and damage characteristics of cement grouted coal and rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(5): 1521-1533.
- [23] 张皓.准脆性材料损伤演化的实验力学研究[D].天津:天津大学,2014:42-45.