

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.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250203

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.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250203

人工冻结工程中浆脉-冻土界面力学特性研究

张立群^{1,2}, 徐维江¹, 张松^{1,2}, 崔宏环^{1,2}, 张辰¹, 胡治强¹

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;

2. 河北建筑工程学院 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心, 河北 张家口 075000)

摘 要: 为探究人工冻结工程中浆脉-冻土界面力学特性, 分析浆脉-冻土界面抗剪强度与冻结负温、初始含水率、法向压力的关系, 基于断裂能理论, 引入韧度系数研究浆脉-冻土界面的力学表现。研究结果表明: 冻结负温、初始含水率主要通过影响浆脉-冻土界面冰胶结力来提升界面黏聚力, 冻结负温对界面强度的影响较为明显。浆脉-冻土界面峰值剪切位移由法向压力、冻结负温、含水率及内部结构等多种因素共同决定, 在高法向压力下随着冻结温度降低, 浆脉-冻土界面韧性系数逐渐增大, 在低法向压力下随着冻结温度的降低浆脉-冻土界面韧性系数先增大后减小, 在初始含水率为15%, 1 200 kPa工况下冻结负温由-5℃降低至-20℃, 浆脉-冻土界面韧性系数增大27%。研究结论为人工冻结工程的安全性能评价提供理论依据。

关键词: 人工冻结; 力学特性; 浆脉-冻土界面; 抗剪强度; 断裂能; 韧性系数

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0720-08

Study on the mechanical properties of the interface between slurry vein and frozen soil in artificial ground freezing

ZHANG Liqun^{1,2}, XU Weijiang¹, ZHANG Song^{1,2}, CUI Honghuan^{1,2}, ZHANG Chen¹, HU Zhiqiang¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;

2. Hebei Innovation Center of Transportation Infrastructure in Cold Region, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To explore the mechanical properties of the interface between grouting and frozen soil in artificial freezing projects, the relationship between the shear strength of the grouting-frozen soil interface and the freezing negative temperature, initial moisture content, and normal stress was analyzed. Based on the fracture energy theory, the toughness coefficient was introduced to study the mechanical performance of the grouting-frozen soil interface. The research results show that the freezing negative temperature and initial moisture content mainly increase the cohesion of the grouting-frozen soil interface by affecting the ice bonding force at the interface, and the freezing negative temperature has a more significant impact on the interface strength. The peak shear displacement of the grouting-frozen soil interface is determined by multiple factors such as normal stress, freezing negative temperature, moisture content, and internal structure. Under high normal stress, the toughness coefficient of the grouting-frozen soil interface gradually increases as the freezing temperature decreases. Under low normal stress, the toughness coefficient of the grouting-frozen soil interface first increases and then decreases as the freezing temperature decreases. Under the conditions of 15% initial moisture content and 1 200 kPa normal stress, when the freezing negative temperature decreases from -5℃ to -20℃, the toughness coefficient of the grouting-frozen soil interface increases by 27%. The research conclusions provide a theoretical basis for the safety performance evaluation of artificial freezing projects.

Keywords: artificial freezing; mechanical properties; interface between grout vein and frozen soil; shear strength; fracture energy; toughness coefficient

收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-06-12 接受日期: 2025-07-02 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172347); 河北省高等学校科学研究项目(QN2025241); 河北建筑工程学院科研基金项目(B-202405)

作者简介: 张立群(1972-), 男, 河北唐山人, 硕士, 教授, 主要从事寒区冻结工程方面的研究。E-mail: zhanliqun5133@163.com

0 引言

人工冻结法是利用人工制冷技术将天然地层经低温冷冻变为人工冻土,从而提高土体强度、阻隔地下水的特殊施工技术^[1-2]。近年来,随着人工冻结法在地铁联络通道、端头井等工程中的推广应用,越来越多高渗透性地层开始使用冻结法进行地层加固。为保证施工质量,这些工程多采用先注浆后冻结的联合加固技术^[3-4],即先利用注浆法进行地层加固,降低渗透系数和地下水流速,然后利用冻结法进行土体加固。该方法形成的冻结壁是由冻土与水泥浆脉混合而成的,其承载能力和服役性能与传统冻结法工程形成的冻结壁不同,因此极易产生工程风险和事故。

要获取含有水泥浆脉冻结壁的真实承载能力,就必须掌握水泥浆脉-冻土在低温冻结环境下的力学特性。虽然有学者对注浆法和冻结法联合加固技术开展了研究,但现有研究方向集中在冻胀融沉问题^[5-6]和冻结壁宏观力学性能问题^[7-8],对于人工冻结环境下浆脉-冻土界面力学特性的研究较少。此外,很多学者针对寒区边坡工程中的冻土与其他结合物界面问题开展了研究。ZHOU等^[9]、谢一

鸣等^[10]、LIN等^[11]针对人工冻结环境下界面力学特性开展了大量界面直剪试验,分析界面抗剪特性的影响因素。史盛等^[12]基于冰晶胶结特性,开展冰-冻土界面、冰-土界面直剪试验,建立了基于冰晶胶结特性的冰-冻土界面非线性弹性损伤模型。何鹏飞等^[13-14]对冻土-混凝土界面冻结强度形成机制进行解释,并研究冻融循环作用对冻土-混凝土界面冻结强度的影响。于学敏^[15]研究了注浆和冻结施工顺序对抗剪强度的影响。

上述研究为浆脉-冻土问题研究提供了可以借鉴的方法,但研究对象、研究条件存在明显的差异,研究成果难以直接使用。本文通过调研人工冻结法技术的应用工况,拟定试验条件,通过界面直剪试验,研究浆脉-冻土界面抗剪性能与法向压力、冻结负温以及初始含水率的关系。揭示界面抗剪强度的组成原则及韧性变化规律,并总结相对应的设计准则,以期对注浆-冻结联合加固工程的设计与施工提供技术支持。

1 试样制备与试验方案

1.1 试样制备

试样制作流程图及直剪仪示意图1。

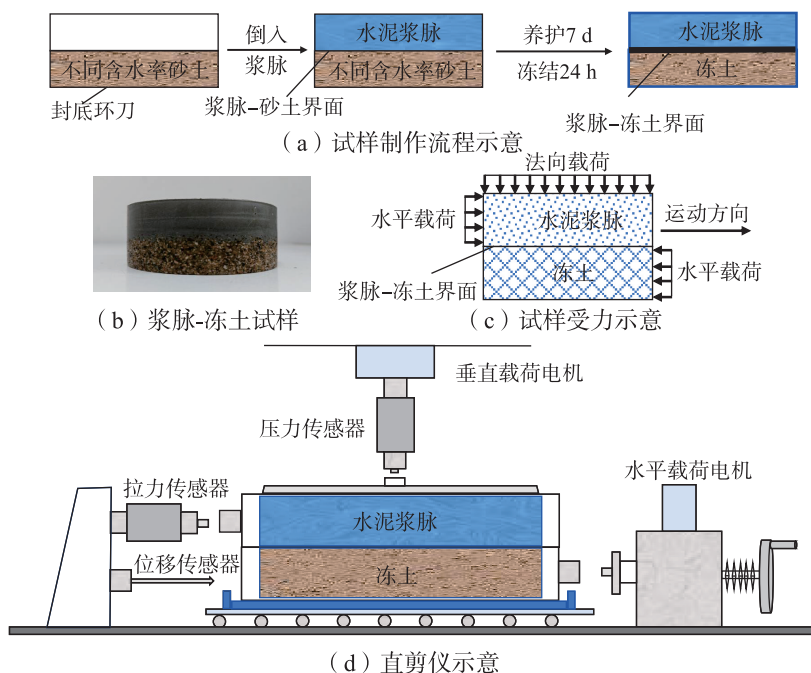


图1 试样制作流程及直剪仪示意

Fig.1 specimen production process and schematic of direct shear instrument

试样土取自广州地铁11号线冻结工程现场,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16],通过筛分试验,获得试样颗粒级配曲线,见图2。其中, d_{10} 为小于该粒径的土颗粒质量

占总质量10%时的粒径,计算得出土样不均匀系数 C_u 为2.81,土样曲率系数 C_c 为1.21。该土样土粒不均匀,级配不良。所有土样在试验前进行烘干,并根据工程地勘报告进行重塑。试样采用现

浇法制作,将配置好不同初始含水率(质量分数)的砂土放入直径为100 mm、高为40 mm的封底环刀中,为控制界面粗糙程度,同时使界面的平整度尽量一致,在环刀中放入滤纸,按95%击实度击实(击实高度20 mm),再取出滤纸。然后在砂土表面缓慢浇筑水泥浆液,直至与环刀顶部齐平。试样制备完成后采用保鲜膜包裹密封并养护7 d,养护完成后将试样放入高低温交变箱冻结24 h。冻结完成后脱模即可进行直剪试验。试验过程中水泥浆液根据《公路隧道帷幕注浆技术规范》(T/CHTS 10088—2023)^[17],采用P·O42.5的普通硅酸盐水泥按照冻结工程设计方案进行配比,水灰比(质量比)为1:1。

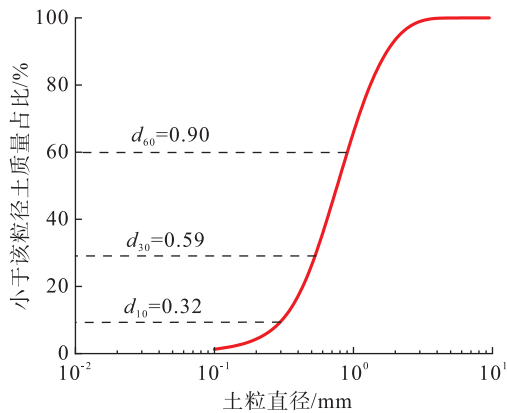


图2 砂土颗粒级配曲线

Fig.2 grain size distribution curve of sandy soil

1.2 试验方案

根据《城市轨道交通工程冻结法施工技术规范》(DB11/T 1972—2022)^[18]及多个现场工程调研数据,拟定试验工况,共进行64组试验,试验分组见表1。采用DSZ-20型全自动直剪残余强度直剪仪进行界面直剪测试,该设备所用剪切土样尺寸为 $\Phi 10\text{ cm}\times 4\text{ cm}$,最大可提供20 kN的法向载荷和水平剪切力,最大水平位移为10 cm,控制精度为0.01 mm,剪切速率设为1 mm/min。

表1 试验分组

Tab.1 experimental grouping

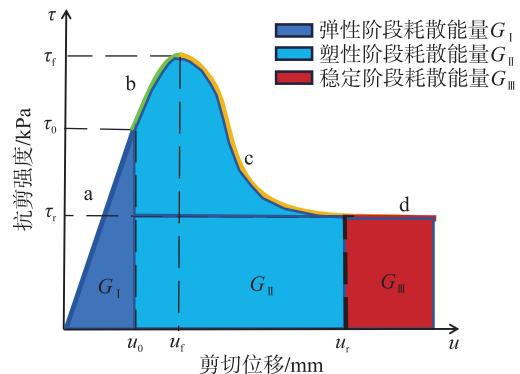
编号	冻结负温/℃	初始含水率/%	法向压力/kPa
1~16	-5	10、15、20、25	300、600、900、1 200
17~32	-10	10、15、20、25	300、600、900、1 200
33~48	-15	10、15、20、25	300、600、900、1 200
49~64	-20	10、15、20、25	300、600、900、1 200

2 试验结果及分析

2.1 浆脉-冻土界面峰值强度分析

浆脉-冻土界面剪应力变化、能量关系见图3。

剪切破坏过程可划分为4个阶段:弹性阶段、应力强化阶段、应力软化阶段和稳定阶段。其中,弹性阶段抗剪强度呈线性增长。随后进入应力强化阶段,抗剪强度增长幅度逐渐降低,并逐渐达到最大峰值。此后断裂破坏开始发生,曲线进入应力软化阶段,抗剪强度逐步降低并最终趋于稳定。最后进入稳定阶段。将屈服强度记为 τ_0 ,对应位移记为屈服剪切位移 u_0 ;峰值强度记为 τ_f ,对应位移记为峰值剪切位移 u_f ;残余强度记为 τ_r ,对应位移记为残余剪切位移 u_r 。为便于数据分析,稳定阶段的剪切位移取2 mm。



a.弹性阶段 b.应力强化阶段 c.应力软化阶段 d.稳定阶段

图3 浆脉-冻土界面剪应力变化、能量关系

Fig.3 shear stress variation and energy relationship at the interface between grout veins and frozen soil

直剪试验得出的浆脉-冻土界面在不同法向压力、不同冻结负温、不同初始含水率下界面峰值强度见图4。在相同初始含水率、冻结负温下,随着法向压力的增大,界面峰值强度线性增大。原因是在相同工况下,浆脉-冻土界面间摩擦系数相同,法向压力增大使浆脉-冻土界面接触力增大,导致抗剪强度增大。在相同初始含水率和法向压力条件下,随着冻结负温的降低,峰值强度逐渐增加,这是由于低温使土体中的水分冻结,增加了浆脉-冻土的黏聚力。在相同温度和法向压力条件下,随着含水率的增加,界面峰值强度总体增加,但相较于其他两种因素对峰值强度的影响不明显。

莫尔-库伦公式为

$$\tau=c+\sigma_N \tan \varphi, \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度, kPa; c 为黏聚力, kPa; σ_N 为法向压力, kPa; φ 为内摩擦角, $^\circ$ 。

根据式(1),对试验数据进行线性拟合,得到不同冻结负温、不同初始含水率下 c 、 φ ,见表2。

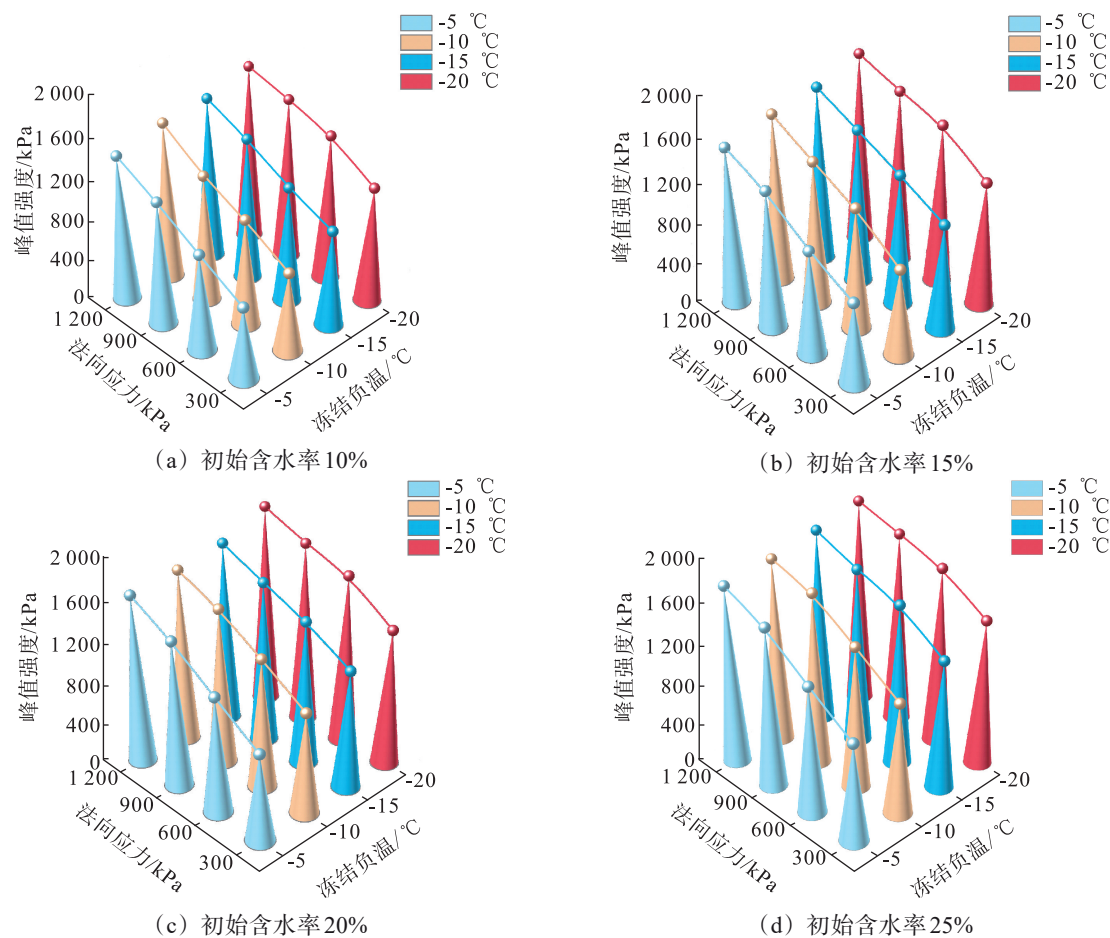


图4 不同初始含水率下浆脉-冻土界面峰值强度

Fig.4 peak strength of slurry vein-frozen soil interface under different initial water content

表2 浆脉-冻土抗剪强度指标			
Tab.2 shear strength indexs of grout vein-frozen soil			
初始含水率/%	冻结负温/℃	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
10	-5	458	39.34
10	-10	525	40.28
10	-15	711	37.26
10	-20	990	33.91
15	-5	520	40.63
15	-10	607	41.49
15	-15	807	37.88
15	-20	1 052	35.83
20	-5	590	41.81
20	-10	711	38.56
20	-15	973	34.35
20	-20	1 177	34.23
25	-5	697	41.64
25	-10	866	39.43
25	-15	1 085	34.93
25	-20	1 275	33.02

相同初始含水率下，随着冻结负温的降低， c 逐渐增加， φ 逐渐减小。在相同冻结负温条件下，随着含水率的增加， c 逐渐增加， φ 增长幅度较小。

上述结果表明，冻土温度对浆脉-冻土界面峰值强度、 c 、 φ 影响较大，而含水率对界面峰值强度、 c 、 φ 影响较小。这是由于冰的胶结能力及稳定性对温度的变化更为敏感，即冻土对温度变化的敏感性高于它对含水率变化的敏感性。故在相同法向压力下评判界面峰值强度问题时，应优先考虑温度变化。

2.2 浆脉-冻土界面强度影响因素分析

冻结负温为-20℃、初始含水率为10%时，浆脉-冻土、浆脉-砂土界面强度变化见图5。其中， σ_{N1} 为浆脉-冻土界面法向压力， σ_{N2} 为浆脉-砂土界面法向压力。在相同法向压力下，抗剪强度稳定后，浆脉-冻土界面的抗剪强度高于浆脉-砂土界面的抗剪强度，这是由于界面处胶结冰破损之后，破碎冰颗粒与冰之间存在摩擦。

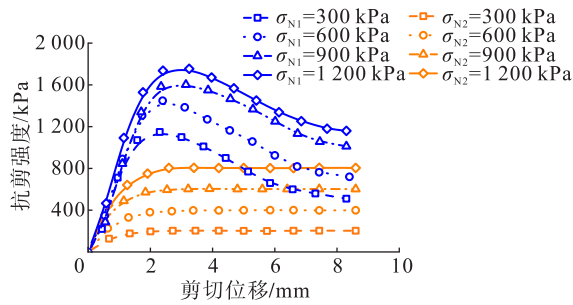


图5 浆脉-冻土、浆脉-砂土界面强度变化

Fig.5 strength variation of slurry vein-frozen soil and slurry vein-sand interfaces

浆脉-冻土界面峰值强度为

$$\tau_f = \tau_i + \tau_{fi} + \tau_{fc}, \quad (2)$$

式中: τ_i 为冰胶结强度, kPa; τ_{fi} 为破碎冰颗粒与冰之间的摩擦强度, kPa; τ_{fc} 为浆脉与土颗粒之间的摩擦强度, kPa。

试验用土为砂土, 土颗粒间无黏聚力, 因此土颗粒摩擦强度 τ_{fc} 可以通过常温下浆脉与砂土(浆脉-砂土)界面间的剪切试验获得。浆脉-砂土界面在剪切过程中抗剪强度不存在峰值点, 抗剪强度达到最大值后趋于平稳, 此时的抗剪强度即为土颗粒摩擦强度。界面峰值强度组成见图6。

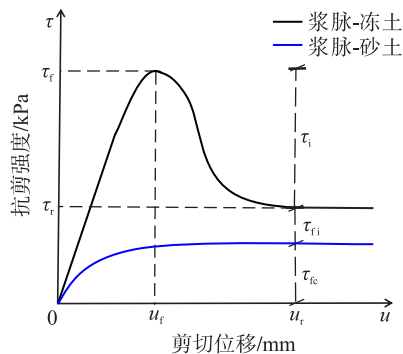
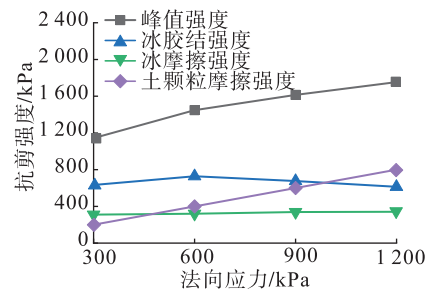


图6 浆脉-冻土、浆脉-砂土界面强度变化示意

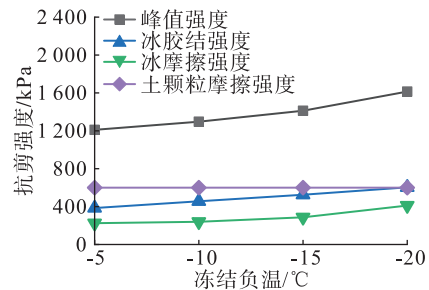
Fig.6 schematic of the interface strength of slurry vein-frozen soil and slurry vein-sand soil

试验结果表明, 在相同冻结负温下, 法向压力主要通过影响浆脉-冻土界面摩擦力来提高界面强度, 但对冰胶结强度的影响相对较小。各组分强度变化见图7。初始含水率为10%、冻结负温为-20℃条件下, 随着法向压力增加, 峰值强度和土颗粒摩擦强度显著上升, 但冰胶结强度、冰摩擦强度变化不大。冻结负温的主要通过影响浆脉-冻土界面胶结冰的冻结力提高界面强度, 但对浆脉-冻土间摩擦力的影响较小。温度降低, 冰摩擦强度增大, 这是浆脉-冻土界面中破碎冰颗粒与冰之间的摩擦(冰摩擦)导致的。初始含水率为10%、法向压力为900 kPa条件下, 随着冻结负温的降

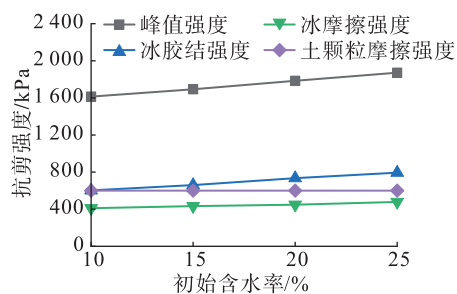
低, 峰值强度、冰胶结强度明显增大, 而冰摩擦强度略有增加, 土颗粒摩擦强度不变。初始含水率的增加使更多的水冻结, 浆脉-冻土界面处形成更多的冰晶, 从而增大冰强胶结强度。冰摩擦强度的增大是由于浆脉-冻土界面破坏后仍有部分冰晶重新胶结, 冰摩擦强度略有上升。冻结负温为-20℃、法向压力为900 kPa条件下, 随着初始含水率增加, 峰值强度、冰胶结强度、冰摩擦强度、土颗粒摩擦强度均提升, 冰胶结强度变化较为明显。



(a) 初始含水率10%, 冻结负温-20℃



(b) 初始含水率10%, 法向压力900 kPa



(c) 冻结负温-20℃, 法向压力900 kPa

图7 各组分强度及峰值强度变化

Fig.7 changes of component strength and peak strength

3 浆脉-冻土界面韧性分析及设计

由直剪试验结果可知, 初始含水率对浆脉-冻土强度影响较小。当初始含水率为15%, 在不同冻结负温、不同法向压力下, 浆脉-冻土试件界面抗剪强度随剪切位移变化曲线见图8。可以看出, 在初始含水率为15%, 冻结负温分别为-5℃、-10℃、-20℃时, 随着法向压力的增加峰值剪切位移递增, 而初始含水率为15%、冻结负温为

-15℃时,随着法向压力的增加峰值剪切位移递减。这是由于冻土中的冰发生了韧性转变,冰的韧性转变由应力状态、温度、含水率及内部结构

等多种因素共同决定^[19]。当冰受到应力时,会表现出机械响应,这种响应取决于应变大小、应变速率以及温度。

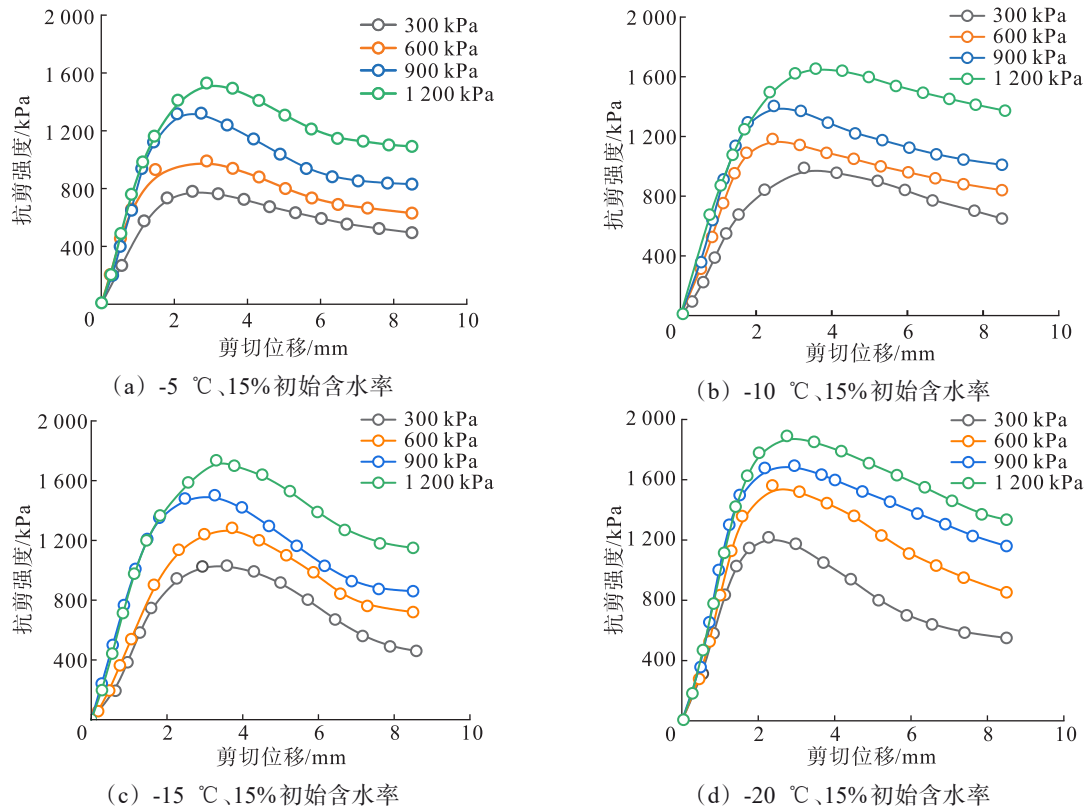


图8 不同条件下界面剪切应力-剪切位移

Fig.8 interface shear stress-shear displacement under different conditions

在冻结负温-15℃、初始含水率15%、法向压力900 kPa条件下,浆脉-冻土与纯冻土抗剪强度随位移变化见图9。可以看出,浆脉-冻土冻结加固体的峰值强度 τ_f 明显优于冻土,其抗剪强度较纯冻土提升约28.49%,同时其峰值剪切位移降低了28.45%。浆脉-冻土界面中注浆体自身的嵌固效应加强了其整体力学性能的表现,但浆脉与冻土力学性能不匹配导致浆脉-冻土先破坏。

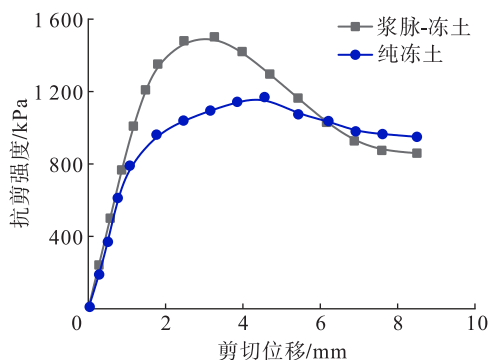


图9 浆脉-冻土与纯冻土抗剪强度随位移变化

Fig.9 variation of shear strength of slurry vein-frozen soil and pure frozen soil with displacement

为了更直观地分析不同工况下峰值强度及其对应的剪切位移变化规律,结合内聚力模型理论^[20-21]及韧性系数概念^[22],表征界面在破坏过程中的增韧效果。韧性系数定义为

$$\gamma_G = \frac{G_{II}}{G}, \quad (3)$$

式中: G_{II} 为塑性阶段耗散能量, J; G 为整个破坏过程的总能量, J。

$$G = \int_0^{\delta} \tau(u) du, \quad (4)$$

$$G = G_I + G_{II} + G_{III}, \quad (5)$$

式(4)、式(5)中: $\tau(u)$ 为剪应力随剪切位移变化的函数; u 为界面完全破坏时的临界剪切位移, mm; G_I 为弹性阶段耗散能量, J; G_{III} 为稳定阶段耗散能量, J。

韧性系数 γ_G 的取值范围为(0,1)。当 γ_G 趋近于1时,表明界面在破坏过程中以韧性断裂为主,塑性变形能力较强;当 γ_G 趋近于0时,界面破坏以脆性断裂为主,塑性变形能力较弱。计算浆脉-冻土断裂能及韧性系数(含水率为15%),结果见表3。

表3 断裂能及韧性系数
Tab.3 fracture energy and toughness coefficient

冻结负温/℃	法向压力/kPa	G_{II}/J	G/J	γ_G
-5	300	4 478	5 062	0.884 6
-5	600	5 411	6 501	0.832 3
-5	900	6 164	8 233	0.748 7
-5	1 200	6 849	10 013	0.684 0
-10	300	5 716	6 437	0.888 0
-10	600	6 740	7 816	0.862 3
-10	900	7 938	9 246	0.858 5
-10	1 200	9 543	11 506	0.829 4
-15	300	5 329	6 076	0.877 1
-15	600	6 610	7 657	0.863 2
-15	900	7 965	9 344	0.852 4
-15	1 200	9 597	11 060	0.867 7
-20	300	5 716	6 811	0.839 2
-20	600	8 128	9 568	0.849 5
-20	900	9 661	11 358	0.850 6
-20	1 200	10 983	12 588	0.872 5

将韧性系数与冻结负温、法向压力进行拟合,拟合结果见式(6), $R^2=0.938$, 拟合曲面见图10。

$$\gamma_G = 0.914 - 0.003\ 1T - 0.000\ 2T^2 + 0.134P - 0.021P^2 + 0.005\ 9TP, \quad (6)$$

式中: T 为冻结负温, $^{\circ}\text{C}$; P 为法向压力, MPa 。

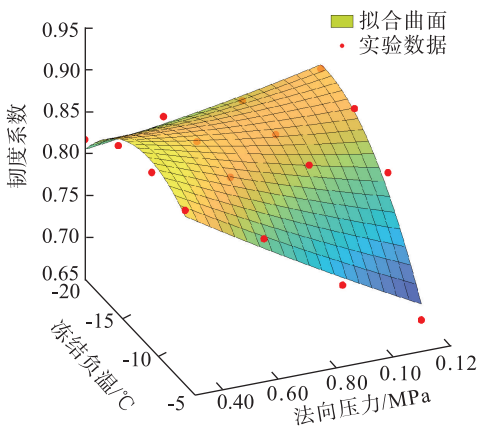


图10 浆脉-冻土界面韧度系数拟合面

Fig.10 fitting surface of the toughness coefficient for slurry vein frozen soil interface

由图10可知,当法向压力较大时,随着冻结温度降低浆脉-冻土界面韧性系数增大;当法向压力较低时,随着冻结温度的降低浆脉-冻土界面韧性系数先增大后减小,但整体变化幅度相较于高法向压力时变化较小。这是由于在高法向压力下,温度降低促进浆脉-冻土界面中冰晶结构的完整性,从而提升界面强度,增大浆脉-冻土界面塑性变形,塑性阶段耗散能增大,宏观表现为浆脉-冻土界面韧性增强。在低法向压力下,温度对韧性的影响

存在一个最大值。在温度未达到最大值时,温度降低使浆脉-冻土界面间冰自身强度提升,并增强界面间未冻水膜的润滑作用,两者共同作用抑制脆性断裂,促进界面韧性增加;在温度达到最大值之后,温度进一步降低导致冰的脆性增强,同时未冻水膜降至临界值以下使其润滑作用基本消失,二者共同作用导致浆脉-冻土界面韧性降低。这意味着,当冻结工程埋深较深时,应尽量降低冻结壁的平均温度,使其界面区域能够承受较大变形,而当冻结工程埋深较浅时,则应从总冻结时间角度出发,合理选择冻结壁平均温度和厚度。

4 结论

(1) 浆脉-冻土界面力学性能除受法向压力影响外,还受到冻结负温和含水率的影响。试验结果表明,冻结负温的降低能有效提升界面黏聚力并降低内摩擦角,含水率的提升主要影响界面黏聚力,对界面内摩擦角影响相对较小。

(2) 浆脉-冻土界面的残余抗剪强度明显高于浆脉-砂土界面的抗剪强度。这是由于界面处胶结冰破损之后,在界面区释放出大量冰颗粒,加剧界面间的摩擦。

(3) 法向压力主要影响浆脉-冻土界面峰值强度和土颗粒摩擦强度,对冰胶结强度影响较小。冻结温度降低使界面冰晶间黏聚力增大,使冰胶结强度明显增大,而对界面破坏后释放冰颗粒的摩擦影响较小,因此对残余强度的影响较小。

(4) 在冻结负温为 $-15\ ^{\circ}\text{C}$ 、初始含水率为15%、法向压力为900 kPa条件下,浆脉-冻土试样抗剪强度比纯冻土试样抗剪强度高28.49%。

(5) 在不同工况下浆脉-冻土界面中的冰发生韧性转变,导致界面峰值剪切位移发生改变。在高法向压力下,随着冻结负温的降低,韧度系数增大。在低法向压力下,随着温度的降低,韧度系数先增大后减小。

参考文献(References):

- [1] 王帅儒,金修伟,陈士军,等.水泥预加固-人工冻结联合工法加固地层冻胀特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13):5566-5576.
WANG Shuairu, JIN Xiuwei, CHEN Shijun, et al. Frost heave characteristics of ground reinforced by cement pre-reinforcement-artificial freezing combined method[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(13):5566-5576.
- [2] 王帅儒. 水泥预加固-人工冻结联合工法加固地铁联络通道温度场及地层冻胀特性研究[D]. 抚州:东华理工大学, 2023:33-38.
- [3] 李乔斌,张哲宁,钟久安,等.注浆法在富水砂卵石地层城市轨道交通联络通道暗挖施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27

- (8):331-334,340.
- LI Qiaobin, ZHANG Zhening, ZHONG Juian, et al. Application of grouting method for underground excavation construction of urban rail transit connecting passage in water-rich sandy cobble stratum [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8):331-334,340.
- [4] 邵新军,李铭远,张景伟,等.复杂场地中盾构出洞水平冻结法现场试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(4):659-667.
- GAO Xinjun, LI Mingyuan, ZHANG Jingwei, et al. Field test of horizontal freezing method for shield tunneling in complex sites[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(4):659-667.
- [5] 王升福,张祥荣,周彪,等.人工冻结水泥改良软黏土冻融及强度特性研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2024,47(4):370-380.
- WANG Shengfu, ZHANG Xiangrong, ZHOU Biao, et al. Experimental study on freeze-thaw and strength characteristics of artificially frozen cement-improved soft clay[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2024, 47(4): 370-380.
- [6] 吕亮.人工冻结水泥改良软黏土冻融及强度特性试验研究[D].抚州:东华理工大学,2023:38-40.
- [7] 鲁先龙,陈湘生,陈曦.人工地层冻结法风险预控[J].岩土工程学报,2021,43(12):2308-2314.
- LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing (AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308-2314.
- [8] ZHANG S, YUE Z R, SUN T C, et al. Analytical determination of the soil temperature distribution and freezing front position for linear arrangement of freezing pipes using the undetermined coefficient method[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 185: 103253.
- [9] ZHOU J, BAN C, LIU C, et al. Study on the shear characteristics of the cemented soil-concrete interface after artificial freeze-thaw under vibration loading[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1333(1): 012024.
- [10] 谢一鸣,陈拓,王建国,等.冻结黏土-混凝土界面动力剪切特性研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(9):2637-2646.
- XIE Yiming, CHEN Tuo, WANG Jianzhou, et al. Study on dynamic shear characteristics of frozen clay-concrete interface[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2637-2646.
- [11] LIN C, WANG G F, GUAN C, et al. Experimental study on the shear characteristics of different pile-soil interfaces and the influencing factors[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 206: 103739.
- [12] 史盛,王冠夫,刘天赐,等.考虑冰晶胶结特性的冰-冻土界面力学特性[J].农业工程学报,2023,39(14):114-124.
- SHI Sheng, WANG Guanfu, LIU Tianci, et al. Mechanical properties of ice-frozen soil interface under cementation of ice crystals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14):114-124.
- [13] 何鹏飞,马巍,穆彦虎,等.冻土-混凝土界面冻结强度特征与形成机理研究[J].农业工程学报,2018,34(23):127-133.
- HE Pengfei, MA Wei, MU Yanhu, et al. Study on freezing strength characteristics and formation mechanism of frozen soil-concrete interface[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23):127-133.
- [14] 何鹏飞,马巍,穆彦虎,等.冻融循环对冻土-混凝土界面冻结强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(2):299-307.
- HE Pengfei, MA Wei, MU Yanhu, et al. Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreeze strength at frozen soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2):299-307.
- [15] 于学敏.含水量对先注浆后冻结粉细砂剪切强度的影响[J].铁道工程学报,2015,32(8):25-30,34.
- YU Xuemin. Effects of water content on shear strength of silty sands reinforced by grouting first and freezing subsequently[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015,32(8):25-30,34.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019:7-10.
- [17] 中国公路学会.公路隧道帷幕注浆技术规程:T/CHTS 10088—2023[S].人民交通出版社股份有限公司,2023:5-9.
- [18] 北京市住房和城乡建设委员会,北京市市场监督管理局.城市轨道交通工程冻结法施工技术规范:DB11/T 1972—2022[S].北京:北京城建集团有限责任公司,2022:8-11.
- [19] STAROSZCZYK R. Ice mechanics for geophysical and civil engineering applications[M]. Cham: Springer International Publishing,2019:81-87.
- [20] YAN C Z, ZHENG H. A coupled thermo-mechanical model based on the combined finite-discrete element method for simulating thermal cracking of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 91: 170-178.
- [21] 张军.界面应力及内聚力模型在界面力学的应用[M].郑州:郑州大学出版社,2011:30-36.
- [22] 蒋金龙.适于钢桥面铺装的钢-UHPC环氧增韧界面受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2021:23-29.