

不同粗糙度等级对冻土 - 混凝土界面剪切特性研究

徐梦琪, 许方博, 武湘栋, 尹丽娥, 王章东

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月25日; 录用日期: 2025年8月15日; 发布日期: 2025年8月27日

摘 要

冻土 - 混凝土界面的剪切力学特性是寒区基础工程抗冻胀设计的关键参数, 其受界面粗糙度、法向应力与含水率的综合影响。本研究通过直剪试验, 系统分析了不同界面粗糙度等级、法向应力及土样初始含水率条件下界面冻结强度的演化规律。试验结果表明: 所有试样的剪切应力 - 剪切位移曲线均呈现应力软化特征。界面峰值剪切强度和冰胶结强度均随粗糙度等级提高而增大, 但残余强度的增幅相对较小。伴随粗糙度等级提升, 冰胶结强度对冻土 - 混凝土界面抗剪强度的贡献比例逐渐增加。峰值强度和残余强度均随法向压力增大而提高。峰值粘聚力随粗糙度等级提高而增大; 残余粘聚力则随细粒含量增加而降低。峰值内摩擦角与残余内摩擦角均随粗糙度等级增大略有上升。

关键词

冻土 - 混凝土界面, 剪切力学, 粗糙度, 剪切强度

Research on the Shear Characteristics of Different Roughness Grades at the Interface between Frozen Soil and Concrete

Mengqi Xu, Fangbo Xu, Xiangdong Wu, Li'e Yin, Zhangdong Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 25th, 2025; accepted: Aug. 15th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

Abstract

The shear mechanical properties of the frozen soil-concrete interface are the key parameters of

文章引用: 徐梦琪, 许方博, 武湘栋, 尹丽娥, 王章东. 不同粗糙度等级对冻土-混凝土界面剪切特性研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2101-2111. DOI: 10.12677/hjce.2025.148228

frost heave resistance design of foundation engineering in cold regions, which are affected by the combination of interface roughness, normal stress and moisture content. In this study, the evolution of interface freezing strength under different interfacial roughness grades, normal stress and initial moisture content of soil samples was systematically analyzed through direct shear tests. The test results show that the shear stress-shear displacement curves of all samples show stress softening characteristics. The peak shear strength of the interface and the ice cementation strength increased with the increase of roughness level, but the increase of residual strength was relatively small. With the increase of roughness level, the contribution of ice cement strength to the shear strength of the frozen soil-concrete interface gradually increased. The peak strength and residual strength increased with the increase of normal pressure. The peak cohesion increased with the increase of roughness level. The residual cohesion decreased with the increase of fine particle content. The peak internal friction angle and the residual internal friction angle increased slightly with the increase of roughness level.

Keywords

Frozen Soil-Concrete Interface, Shear Mechanics, Roughness, Shear Strength

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冻土广泛分布于高纬度与高海拔地区,其独特的物理力学特性对寒区基础工程(如建筑基础、桥梁桩基、输油管道等)的稳定性构成严峻挑战[1]。在冻融循环作用下,冻土与结构物接触界面的剪切强度退化是诱发工程冻胀破坏的关键因素之一[2]。混凝土作为寒区工程中广泛使用的结构材料,其与冻土界面的力学行为直接影响着基础的抗冻胀性能与长期耐久性[3]。

粗糙度是影响界面剪切特性的重要因素之一。研究表明,粗糙度的变化会显著影响界面的抗剪强度、摩擦系数等力学参数。在土与结构接触面的研究中,已有大量文献探讨了粗糙度对界面剪切特性的影响[4]-[6]。胡黎明和濮家骝[7]通过试验研究了土与结构接触面的物理力学特性,发现粗糙度对界面的抗剪强度有显著影响。王永洪等[8]研究了接触面粗糙度对黏性土-混凝土界面剪切特性的影响,结果表明粗糙度的增加可以提高界面的抗剪强度。然而,这些研究主要集中在非冻土环境下的土与结构接触面,对于冻土与混凝土界面的研究相对较少。He F [9]等改进 Nishihara 模型,结合不同粗糙度混凝土-冻土接触面的大型剪切蠕变试验,发现了粗糙度对蠕变抑制效应及长期强度阈值的关联机制。Maria J R 等[10]通过直接剪切试验和 2D 激光扫描技术量化分析不同表面处理混凝土界面,提出基于多参数耦合的新型组合粗糙度指标,为界面摩擦机制解析及剪切强度预测提供了精细化表征方法。Ruichang F 等[11]通过 3D 打印技术定量重构混凝土表面粗糙度,结合冻土-混凝土界面直剪试验与细观结构分析,揭示了界面粘滑破坏的二元机制(脆性破坏/应变软化),阐明了粗糙度对剪切收缩/膨胀的调控规律,量化了表面形貌对抗剪强度的梯度影响效应。Xuan W 等[12]开展红黏土-混凝土界面循环剪切试验(法向应力 100~300 kPa、循环次数 1000 次),揭示界面在位移控制循环荷载下的累积收缩特性及剪切刚度退化规律,阐明法向应力-粗糙度-循环次数耦合效应对软化行为的影响机制,证实循环荷载虽导致界面刚度衰减但未引起循环后强度劣化,为土-结构动力相互作用系统的稳定性评估提供了试验依据。

冻土与混凝土界面的剪切特性不仅受到粗糙度的影响,还受到冻土的温度、含水量、冻结状态等多

种因素的综合影响[13]-[15]。吉延峻等[16]通过直剪试验研究了现浇混凝土与冻土接触面的冻结强度，发现冻结强度随冻土的温度和含水量的变化而变化。赵联桢等[17]研制了大型多功能冻土 - 结构接触面循环直剪系统，并对其进行了应用研究，进一步揭示了冻土 - 结构接触面的力学特性。这些研究表明，冻土与混凝土界面的剪切特性是一个复杂的力学问题，需要综合考虑多种因素的影响。Wan X 等[18]通过开展不同环境温度和法向应力条件下的冻土 - 混凝土界面直剪试验，结合粒子流码(PFC)数值模拟，系统揭示了剪切带形成机制及颗粒位移、力链演化等细观力学特性，建立了温度 - 内聚力 - 摩擦系数回归方程。Zhang K 等[19]设计新型温控直剪试验系统，结合数字图像相关(DIC)技术和多变量耦合分析，发现低温下冰结合强度主导的应变软化特征及再冻结效应对残余强度的调控机制。Zhou J 等[20]开展胶结土 - 混凝土界面振动剪切试验及无侧限压缩试验，发现了固化时间对界面剪切强度和胶结土抗压强度的时效强化规律。王伯昕等[21]进行了冻融循环 - 直剪耦合试验，界面呈现应变硬化双阶段特征，冻融循环通过降低内摩擦角和黏聚力导致强度劣化，损伤度呈现两阶段演化，法向应力强化效应与含水率弱化效应形成对抗机制。周亚龙等[22]通过冻结砂土 - 混凝土界面负温直剪试验与三折线本构建模，揭示了冰膜厚度与界面剪切强度(峰值/残余)的双曲线演化规律，构建了融合温度 - 法向应力 - 冰膜厚度的界面剪切本构模型及桩基冻拔位移理论计算体系。

然而，现有研究多聚焦于冻土自身力学特性或结构物整体响应，对冻土 - 混凝土界面剪切特性的系统性认知仍存在显著不足，尤其是界面粗糙度这一关键参数的影响机制尚未得到充分揭示。本文通过冻土 - 混凝土直剪试验，研究不同粗糙度等级、法向应力及土样初始含水率条件下对冻土 - 混凝土界面冻结强度的演化规律。

2. 界面直剪试验设计及试验方法

试验采用冻土 - 混凝土二元体试样，利用应变控制式直剪仪进行不同界面粗糙度等级的冻土 - 混凝土直剪试验。获取冻土 - 混凝土界面剪切全过程的应力 - 位移数据，研究法向压力与界面粗糙度对冻结强度的影响机制。

2.1. 试验材料性质

本试验所用土样取自青藏高原可可西里多年冻土区，参照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)对该土样的基本物理性质和粒径分布进行分析，相应数据见下表 1、表 2，测得试验土样属低液限黏土。

Table 1. Physical properties of the test soil
表 1. 试验用土物理性质

液限(%)	塑限(%)	塑性指数	天然含水率(%)	干密度(g/cm³)
28.9	14.6	14.3	22	1.721

Table 2. Particle size distribution of test soil
表 2. 试验用土粒径分布

粒径(mm)	<0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~5	5~10	10~20
百分比含量(%)	43.653	30.945	4.866	4.842	11.351	3.347	0.997

为制备出高质量的混凝土试块，需仔细考虑原材料的参数。具体来说，水泥是混凝土的主要胶结材料，因此选择 PO42.5 级普通硅酸盐水泥。骨料是混凝土的骨架，可以提供一定的强度和稳定性，选择 1~2

mm 砾石及天然河沙作为骨料。此外,由于水的质量会直接影响混凝土的强度和耐久性,因此选择纯净水作为混凝土试块制备过程中所用水。

2.2. 试验制备

试样的制备包括混凝土试样制备、土样制备、冻土 - 混凝土二元体试样制备,具体制作过程如下:

(1) 混凝土试样制备:采用直径 61.8 mm、高度 20 mm 的环刀作为模具。为防止漏浆,在环刀底部粘贴胶带密封;内壁均匀涂抹凡士林以利脱模。使用 PO42.5 普通硅酸盐水泥,并选用 1~2 mm 粒径砾石(确保试样尺寸大于最大骨料粒径 5 倍以上)。按水泥:砾石:天然河沙:水 = 1:1.36:1.28:0.5 的比例配制水泥砂浆。将砂浆均匀装入环刀,振捣抹平至试样表面与环刀上沿齐平。为探究不同界面粗糙度对冻土 - 混凝土界面相互作用的影响,故在混凝土试样初凝之前对混凝土界面进行不同粗糙面的制作,分别用 3 mm、6 mm、9 mm、12 mm 的网格在混凝土顶面进行压印,制作 R-1、R-2、R-3、R-4 四种粗糙度等级的混凝土试块,以及光滑面混凝土试块作 R-0 对照组如图 1(a)从左到右分别为 R-1、R-2、R-3、R-4。在混凝土试样初凝后,从环刀中取出,并按照标准程序养护 28 d [23]。

(2) 土样制备:将原状土样在 105℃ 的烘干箱内烘干 24 h,碾碎过 2 mm 的土工标准筛,配置初始含水率 14%、16% 的试验土样。采用公式(1)与公式(2)计算干土质量 m 与所需加水量 m_w ,以制备湿土样。充分搅拌,然后置于密封袋中,使干土与水分充分融合,确保土体内部水分分布均匀,静置 24 小时后,进行含水率复测,合格后作为试验用土。

$$m = (1 + 0.01w_0) \rho_d V \quad (1)$$

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w - w_0) \quad (2)$$

式中: m ——土质量/kg; m_w ——水质量/kg; ρ_d ——干密度(g/cm³); w ——含水率(%); w_0 ——初始含水率(%)。

(3) 冻土 - 混凝土二元体试样制备:采用高 40 mm、直径 61.8 mm 的环刀作为模具。预先用胶带密封环刀一端。将混凝土试块粗糙面向上置于密封端,光滑面向下贴紧胶带。按目标干密度(1.7 g/cm³)及预定含水率称取土料。将土样分两层(每层厚 10 mm)均匀装入环刀模具中逐层压实:第一层击实至设定高度后打毛表面,再填筑并压实第二层。制得试样如图 1(b)所示。随后用保鲜膜包裹整个试样密封防失水如图 1(c)、图 1(d),置于-20℃环境中冷冻 24 小时。



(a) 不同粗糙度混凝土试块



(b) 混凝土 - 冻土二元试块

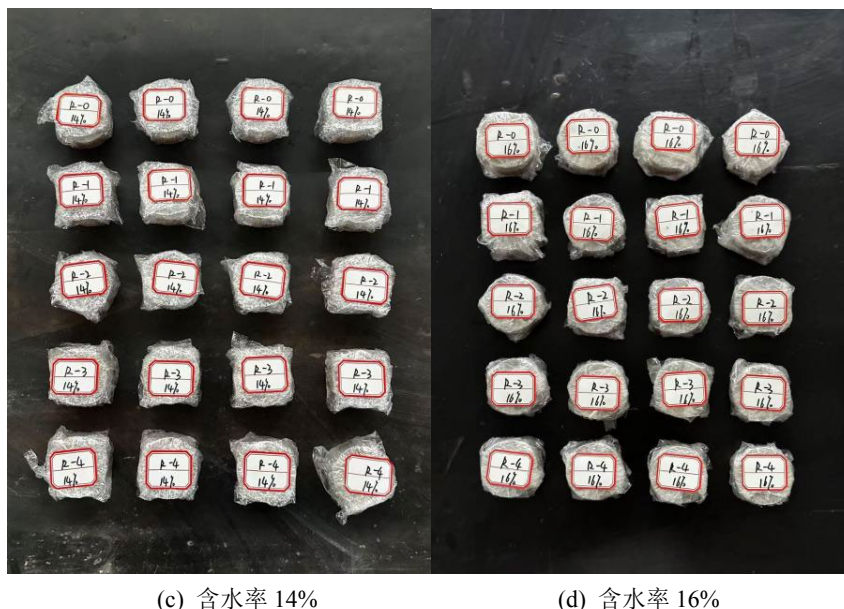


Figure 1. Sample picture
图 1. 试样图片

2.3. 试验仪器

使用采用南京土壤仪器厂 ZJ 型应变控制直剪仪进行冻土 - 混凝土界面冻结强度试验。该仪器剪切盒分上下两部分, 高度均为 20 mm: 上盒连接测力计, 下盒连接加载装置。冻土 - 混凝土试样的冻结界面与上下盒中缝(即剪切面)精确对准。试验采用位移控制方式, 以 0.8 mm/min 的速率进行剪切加载。

2.4. 试验过程

本文中试验流程为: 首先调试直剪仪确保运行正常; 随后将试样装入剪切盒, 调整测力环, 加盖并施加法向压力后启动剪切; 剪切过程中同步记录位移与剪切力, 软件生成其关系曲线以实时监测进程(试样受力状态如图 2: 上表面均布法向压力, 上半部受水平推力驱动冻土右移, 下半部混凝土右侧承受水平反力, 导致接触面发生剪切变形直至破坏)。试验采用位移控制模式, 以 0.8 mm/min 速率进行快剪, 法向应力设定为 100、200、300、400 kPa。

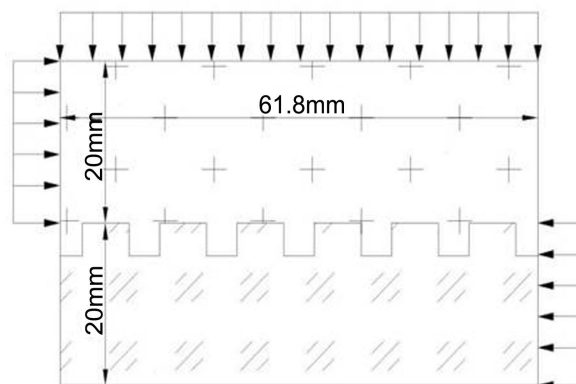


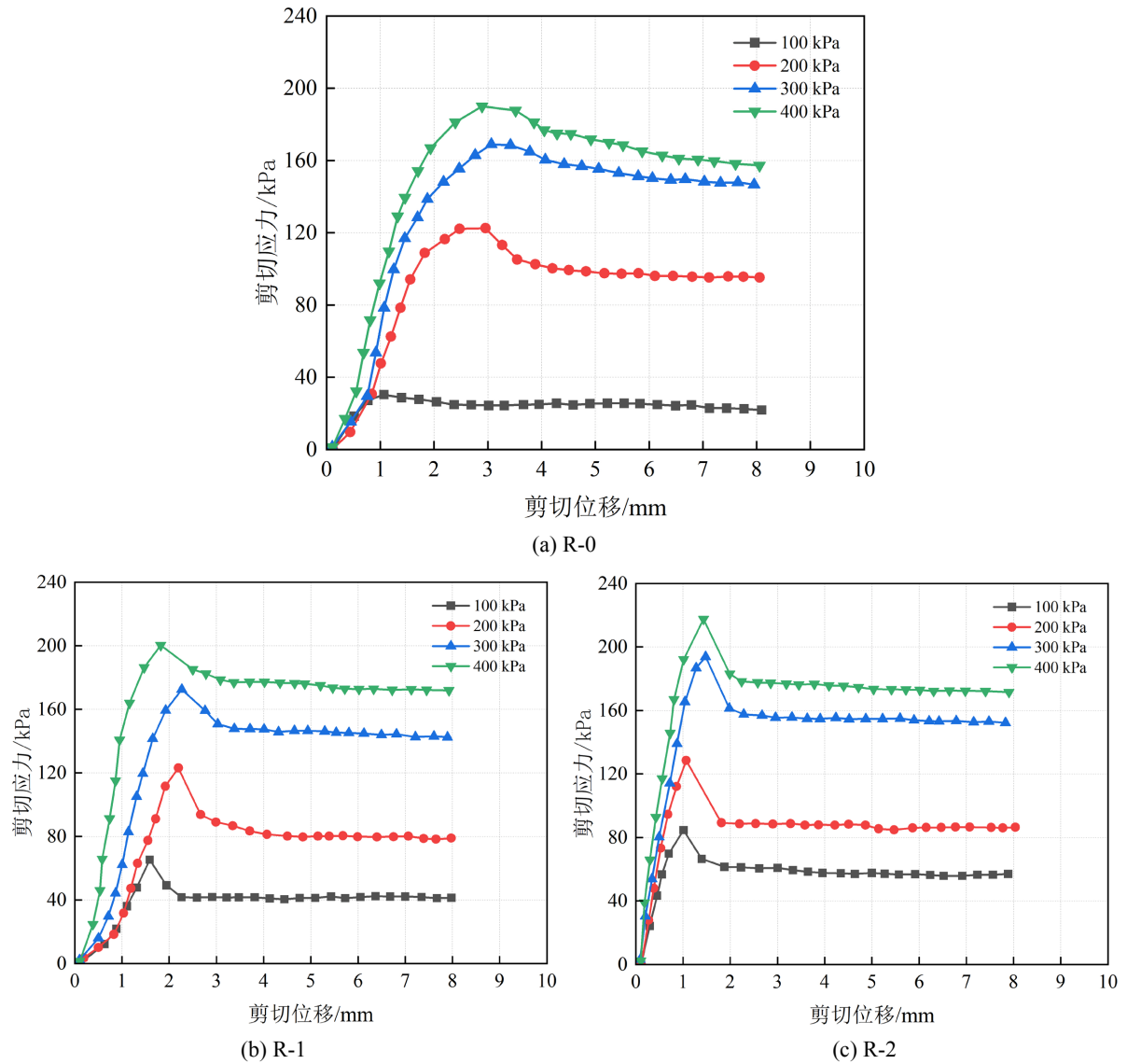
Figure 2. Loading diagram
图 2. 加载示意图

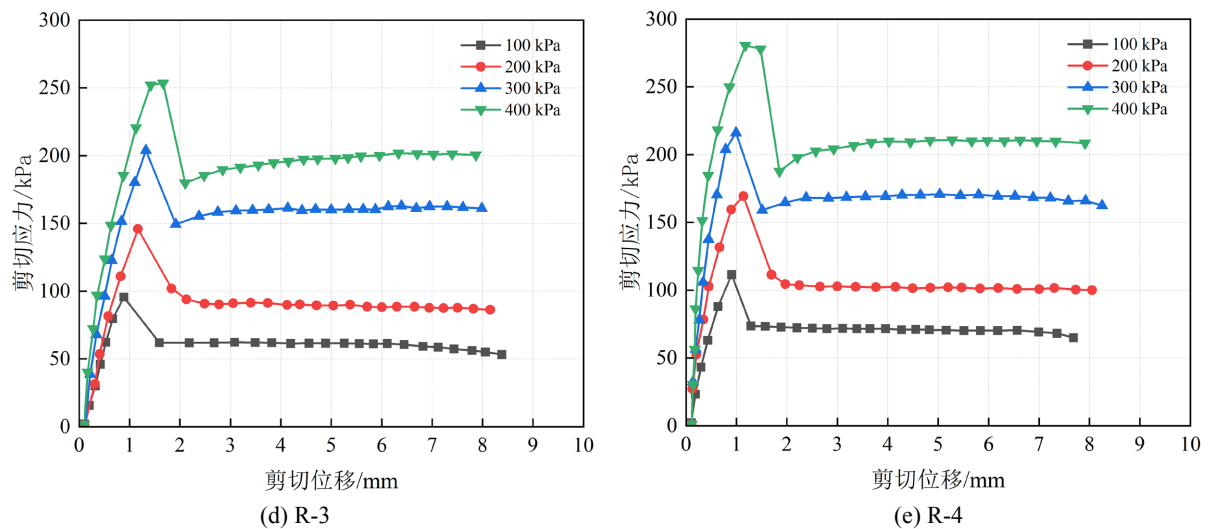
3. 试验结果及分析

冻土-混凝土界面因冰胶结作用,其剪切应力-位移曲线通常呈应变软化特征。残余强度对大变形下的界面稳定性分析具有重要价值,故需分别分析不同粗糙度条件下的峰值与残余强度特征:将剪切应力最大值定义为峰值强度,剪切位移达 5 mm 时的应力值定义为残余强度。

3.1. 试剪切应力-剪切位移曲线

图 3 为不同界面粗糙度的剪切应力-位移曲线。整体而言,剪切应力-位移曲线呈现应变软化特征:应力达到峰值后,随位移持续增大而出现一次显著跌落,随后进入残余阶段。峰值前阶段,界面胶结冰与颗粒间黏聚力共同抵抗剪切变形,应力随变形发展而快速上升;随后部分冰晶断裂,颗粒(土、冰)发生滚动与滑动,界面产生塑性变形直至峰值。不同条件下,界面剪切应力均在位移 1~2 mm 处达到峰值。峰值后软化阶段,颗粒完全进入滑动状态,胶结冰持续断裂直至完全破坏,界面剪切应力随之逐渐下降并趋于稳定。





注：含水率为 14%。

Figure 3. Interfacial shear stress and shear displacement curves under different interfacial roughness and normal stress conditions

图 3. 不同界面粗糙度和法向应力条件下界面剪切应力与剪切位移曲线

从图 3 中可以看到，峰值后剪切应力快速下降归因于界面胶结冰含量较高，该胶结冰脆性破坏后引起界面剪切应力显著降低。随后，伴随界面胶结冰完全破坏及土颗粒和冰晶颗粒的持续滑动，界面逐渐进入残余稳定阶段，此时剪切应力不再随剪切位移增大而发生显著变化。

界面粗糙度等级对剪切应力 - 位移曲线的整体形态影响相对有限，然而对峰值及残余剪切应力的作用较为突出。分析不同粗糙度界面的曲线可知，粗糙度大小显著制约着峰值剪切强度，该强度普遍随粗糙度等级的提高而增大。在初始含水率 14%、法向应力 400 kPa 条件下，对应界面粗糙度等级 R-0、R-1、R-2、R-3、R-4，其峰值剪切强度依次测得为 190.04 kPa、200.27 kPa、217.59 kPa、253.48 kPa、280.64 kPa。

3.2. 峰值剪切强度特征

图 4 为界面峰值剪切强度随粗糙度等级变化曲线。对于两种含水率条件(14%与 16%)，峰值剪切强度均随界面粗糙度等级提高呈现显著增长态势。图 4(a)展示了初始含水率 14%时，各法向应力水平下的峰值剪切强度。观察可见，峰值剪切强度随粗糙度等级增加呈现显著提升。在 100 kPa 时从粗糙度等级 R-0 到 R-4，峰值剪切强度由 30.42 kPa 提升至 111.46 kPa；在 400 kPa 时从粗糙度等级 R-0 到 R-4，峰值剪切强度由 190.04 kPa 提升至 280.64 kPa。图 4(b)为初始含水率 16%时，不同法向应力下的峰值剪切强度，对比初始含水率 14%时的峰值剪切强度普遍提高，在 100 kPa 时从粗糙度等级 R-0 到 R-4，峰值剪切强度由 46.45 kPa 提升至 130.22 kPa；在 400 kPa 时从粗糙度等级 R-0 到 R-4，峰值剪切强度由 211.61 kPa 提升至 296.85 kPa。

土体自身抗剪强度及其与构筑物界面抗剪强度受多因素影响，其中莫尔 - 库仑剪切强度准则应用最为普遍，其表达式如式(3)所示，核心强度参数为黏聚力和内摩擦角。在描述界面剪切强度时，这两个参数可表征为界面黏聚力与界面摩擦角。

$$\tau_f = c + \sigma_N \tan \varphi \quad (3)$$

式中， τ_f 为抗剪强度， c 为界面粘聚力， φ 为界面摩擦角， σ_N 为法向应力。

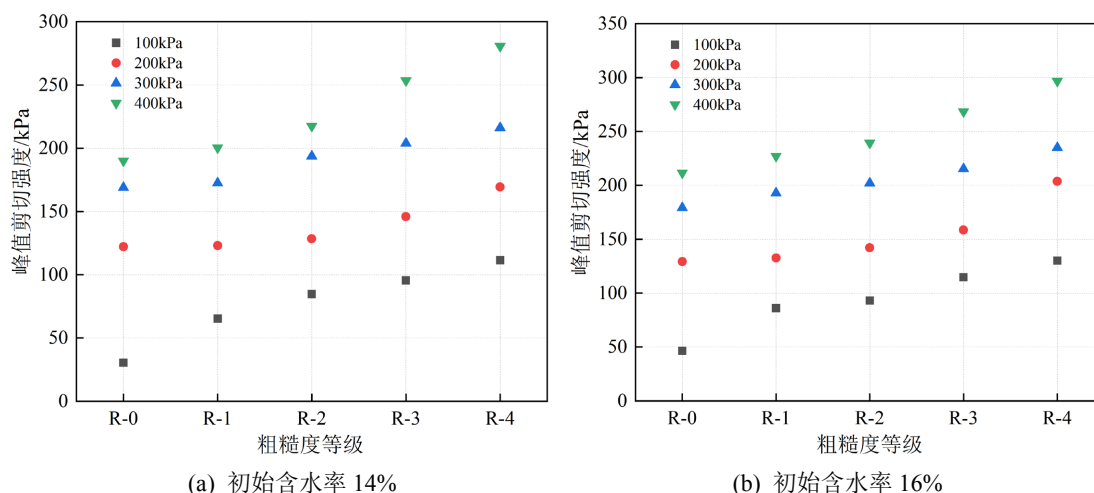


Figure 4. Curve of peak shear strength with roughness level

图 4. 峰值剪切强度随粗糙度等级变化曲线

图 5 为界面剪切强度与法向应力的关系曲线。总体而言，在初始含水率与界面粗糙度等级一致时，界面峰值剪切强度随法向应力呈线性增长。图 5(a)具体呈现了初始含水率 14%条件下，不同粗糙度等级对应的峰值剪切强度。图中数据表明，峰值剪切强度随法向应力增大而显著提高。在粗糙度等级为 R-0 时，法向应力由 100 kPa 增加至 400 kPa，峰值剪切强度从 30.42 kPa 增强至 190.04 kPa，增幅为 159.62 kPa；在粗糙度等级为 R-4 时，法向应力由 100 kPa 增加至 400 kPa，峰值剪切强度从 111.46 kPa 增强至 280.64 kPa，增幅为 169.18 kPa；图 5(b)为初始含水率 16%时不同粗糙度条件下的峰值剪切强度。可以看到峰值剪切强度随法向应力的增加而增加。在粗糙度等级为 R-0 时，法向应力由 100 kPa 增加至 400 kPa，峰值剪切强度从 46.45 kPa 增强至 211.61 kPa，增幅为 165.16 kPa；在粗糙度等级为 R-4 时，法向应力由 100 kPa 增加至 400 kPa，峰值剪切强度从 130.22 kPa 增强至 296.85 kPa，增幅为 166.63 kPa。初始含水率 16%时的整体峰值剪切强度高于初始含水率 14%时的整体峰值剪切强度，这是因为高含水率提供了更多冰胶结介质。但高含水率的峰值剪切强度相较于低含水率的峰值剪切强度增幅较低，这是由于含水率过高，土体内有较高含量的未冻水。

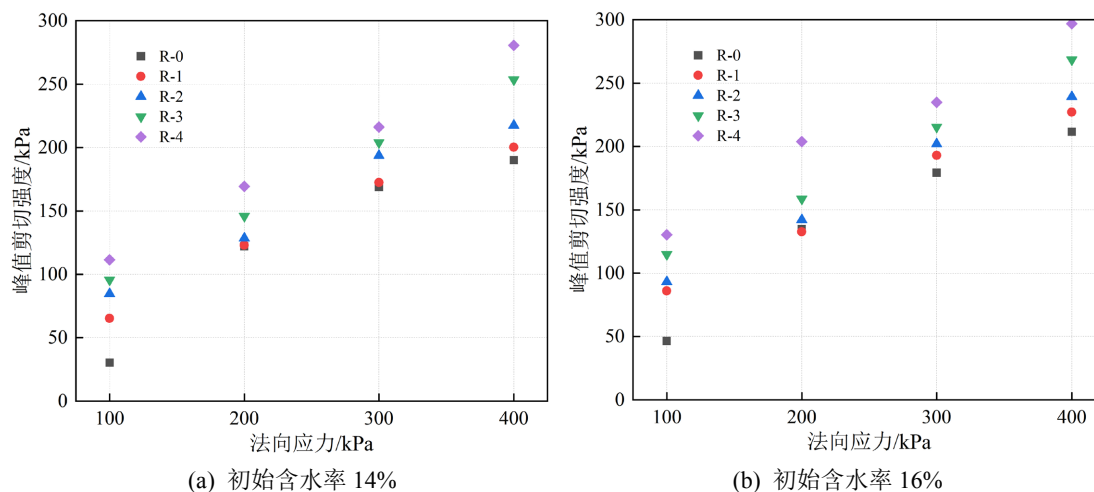


Figure 5. Relationship curve between interfacial shear strength and normal stress

图 5. 界面剪切强度与法向应力的关系曲线

表 3 为不同界面粗糙度等级的界面峰值抗剪强度参数。由表可知，随界面粗糙度等级提高，峰值粘聚力明显提升，峰值内摩擦角同样显现上升态势。上述变化主要源于界面粗糙度增大促进了土颗粒与混凝土间冰胶结力的增强，进而促使峰值粘聚力急剧升高。

Table 3. Peak interface shear strength parameters with different interface roughness levels
表 3. 不同界面粗糙度等级的界面峰值抗剪强度参数

初始含水率/%	粗糙度等级	峰值粘聚力/kPa	峰值摩擦角/(°)
14%	R-0	15.14	23.33
	R-1	21.72	26.82
	R-2	35.07	24.95
	R-3	41.71	29.03
	R-4	55.81	29.41
16%	R-0	8.01	25.65
	R-1	38.81	24.68
	R-2	44.52	24.87
	R-3	59.71	28.53
	R-4	85.71	27.32

3.3. 残余剪切强度特征

图 6 为界面残余剪切强度随粗糙度等级变化曲线。所有粗糙度等级下，残余剪切强度均随法向应力增大近似线性增长，但相较于峰值剪切强度的增幅较低，表明界面破坏后残余强度的提升主要依赖法向应力对碎冰 - 土颗粒摩擦的压制作用。残余强度随着粗糙度等级的增大而增大，如在初始含水率 14%、法向应力为 100 kPa 时，粗糙度等级由 R-0 到 R-4，残余剪切强度由 25.41 kPa 提升至 70.82 kPa。对比图 6(a)、图 6(b)可以看出初始含水率 16%时的残余强度整体高于初始含水率 14%时残余强度，因高含水率提供了更多再生冰胶结介质。

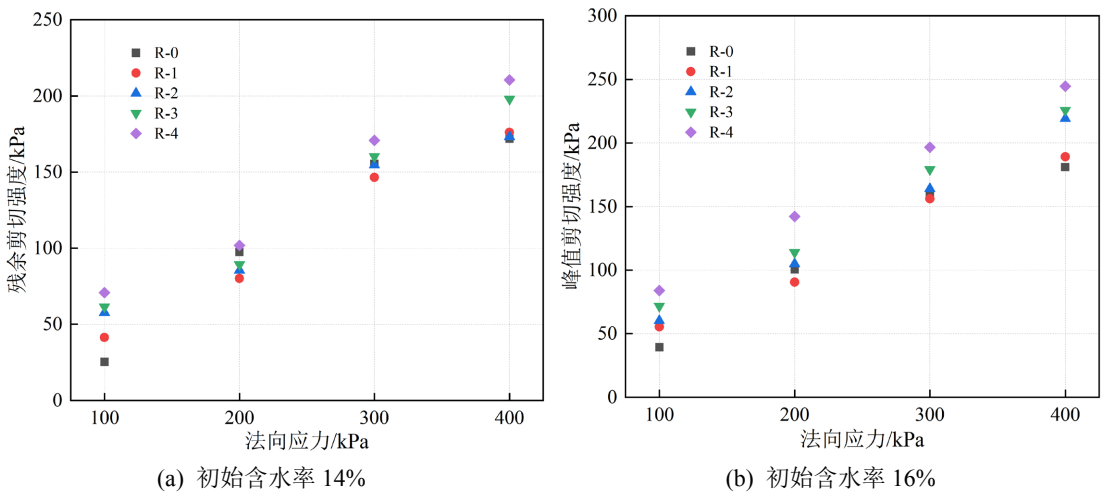


Figure 6. Curve of residual shear strength with roughness grade

图 6. 残余剪切强度随粗糙度等级变化曲线

在残余强度阶段，进入残余强度阶段后，界面经大位移变形，其胶结作用基本丧失。故计算界面强度参数时设界面黏聚力为 0，此时强度贡献仅源于界面摩擦角。表 4 列出了不同界面粗糙度等级对应的残余摩擦角。数据显示，残余摩擦角随粗糙度等级提高而小幅上升。

Table 4. Parameters of residual shear strength of interfaces with different interface roughness grades
表 4. 不同界面粗糙度等级的界面残余抗剪强度参数

初始含水率/%	粗糙度等级	峰值摩擦角/(°)
14%	R-0	33.02
	R-1	35.43
	R-2	36.65
	R-3	36.83
	R-4	39.41
16%	R-0	33.65
	R-1	35.68
	R-2	37.87
	R-3	38.53
	R-4	40.32

4. 结论

本文通过冻土 - 混凝土直剪试验，研究不同界面粗糙度等级对冻土 - 混凝土桩基界面剪切强度的影响，同时结合了不同初始含水率的因素，研究结果如下：

- (1) 冻土 - 混凝土界面剪切试样的应力 - 位移曲线均呈现应力软化特征，并可划分为三个典型阶段：弹性阶段、破坏阶段与稳定阶段。
- (2) 冻土 - 混凝土界面的峰值剪切强度与冰胶结强度均随粗糙度等级提高而增大，残余强度的提升幅度相对较小。伴随粗糙度等级增加，冰胶结强度在界面总剪切强度中的贡献占比逐渐上升。
- (3) 同一界面粗糙度等级条件下，试样峰值剪切强度与残余剪切强度均随法向应力线性递增。
- (4) 界面粗糙度等级变化显著影响冻土 - 混凝土界面粘聚力，表现为峰值粘聚力随粗糙度等级提高而增大；同时，峰值内摩擦角及残余内摩擦角随粗糙度等级增加亦呈现小幅上升。

参考文献

[1] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[2] 蒋代军. 多年冻土地基桩土界面特性及桩基竖向承载性状研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.

[3] 宋宏芳. 深季节冻土区高速铁路路基防冻胀基床结构研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.

[4] 徐理力. 高温冻土与现浇混凝土接触面蠕变特性及本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.

[5] 董旭光, 吕江飞, 李宏波, 等. 冻土-钢界面三轴剪切试验及接触损伤力学模型研究[J]. 冰川冻土, 2025, 47(3): 734-746.

[6] 胡峻晖, 崔宏环, 王跃庚, 等. 细粒含量对冻土-桩界面剪切特性影响研究[J]. 力学季刊, 2024, 45(3): 842-854.

[7] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001(4): 431-435.

[8] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 接触面粗糙度对黏性土-混凝土界面剪切特性影响研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(10):

93-97.

- [9] He, F., Lei, W., Mao, E., Liu, Q., Chen, H. and Wang, X. (2024) Creep Constitutive Modeling of the Shear Strength of the Permafrost-Concrete Interface Considering the Stress Level at -1°C . *PLOS ONE*, **19**, e0297824. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297824>
- [10] Raposo, J.M., Cavaco, E., Neves, L.C. and Júlio, E. (2024) A Novel Roughness Parameter for More Precise Estimation of the Shear Strength of Concrete-to-Concrete Interfaces. *Construction and Building Materials*, **410**, Article ID: 134146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134146>
- [11] Fang, R., Wang, B., Pan, J., Liu, J., Wang, Z., Wang, Q., et al. (2023) Effect of Concrete Surface Roughness on Shear Strength of Frozen Soil-Concrete Interface Based on 3D Printing Technology. *Construction and Building Materials*, **366**, Article ID: 130158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130158>
- [12] Wang, X., Cheng, H., Yan, P., Zhang, J. and Ding, Y. (2021) The Influence of Roughness on Cyclic and Post-Cyclic Shear Behavior of Red Clay-Concrete Interface Subjected to up to 1000 Cycles. *Construction and Building Materials*, **273**, Article ID: 121718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121718>
- [13] Yuan, S., Cong, J., Fang, X., Wu, Y. and Yu, H. (2024) Experimental Study on the Shear Characteristics of Frozen Soil-Concrete Interface under the Constant Normal Stiffness. *Engineering Reports*, **6**, e12989. <https://doi.org/10.1002/eng2.12989>
- [14] 万旭升, 周浩, 路建国, 等. 盐渍冻土-混凝土接触面剪切特性试验研究[J/OL]. 工程地质学报, 1-16. <https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0277>, 2025-05-05.
- [15] 王瑞. 高原冻土与结构界面剪切特性试验研究及损伤本构关系探讨[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [16] 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.
- [17] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 707-713.
- [18] Wan, X., Zhou, H., Zhou, F., Zhu, J. and Shahab, K.M. (2025) Mesoscopic Shear Evolution Characteristics of Frozen Soil-Concrete Interface. *Cold Regions Science and Technology*, **229**, Article ID: 104342. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104342>
- [19] Zhang, K., Yan, J., Mu, Y., Zhu, X. and Zhang, L. (2024) Global and Local Shear Behavior of the Frozen Soil-Concrete Interface: Effects of Temperature, Water Content, Normal Stress, and Shear Rate. *Buildings*, **14**, Article No. 3319. <https://doi.org/10.3390/buildings14103319>
- [20] Zhou, J., Ban, C., Liu, C. and Zhou, H. (2024) Study on the Shear Characteristics of the Cemented Soil-Concrete Interface after Artificial Freeze-Thaw under Vibration Loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1333**, Article ID: 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1333/1/012024>
- [21] 王伯昕, 高银龙, 王清, 等. 冻融循环对季冻土区粉质黏土-混凝土界面剪切性能的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1592-1603.
- [22] 周亚龙, 王旭, 蒋代军, 等. 考虑冰膜厚度的桩-土界面剪切特性及冻拔计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2806-2819.
- [23] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.