

# 开敞系统中冻土-混凝土界面抗拉强度试验研究

孙铁成<sup>1,2,3</sup>, 杨逸<sup>3</sup>, 杨茜<sup>3</sup>, 董创奇<sup>4</sup>

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

4. 中建科工集团有限公司, 广州 深圳 518000)

**摘要:**在寒区桩基工程中, 冻土-混凝土界面强度对于桩基础的受力状态有着重要的影响。在开敞系统条件下进行了冻土-混凝土界面区的抗拉强度正交试验, 利用极差方差分析法, 厘清了界面粗糙度、土样含水率、试验温度及干密度4种试验因素对界面冻结抗拉强度影响的主次顺序。分析试验结果表明, 土样含水率的增大、试验温度的降低及接触面粗糙度的提升均可使界面冻结抗拉强度不断提高; 存在临界土样含水率, 当含水率位于临界含水率两侧时, 接触面粗糙度因水分迁移所形成冰膜改变的程度不同, 导致接触面粗糙度的增加对界面冻结抗拉强度增幅的影响程度具有不同的规律。

**关键词:**冻土-混凝土界面; 冻结抗拉强度; 开敞系统; 水分迁移; 正交试验

**中图分类号:** TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0092-07

## 0 引言

随着中国民族振兴战略的实施, 大批基础设施拟在冻土区修建。桩基础作为土木工程中广泛采用的基础形式, 其在冻土区的稳定性和耐久性成为该区域建设充分发挥经济效能的关键保障。在地层冻融循环过程中, 桩基础侧面因土体的冻胀<sup>[1]</sup>而受到沿桩身方向的冻拔力作用, 若该冻拔力得不到有效控制, 容易诱发一系列危害工程稳定与安全的冻拔病害<sup>[2-3]</sup>。其中锥形桩因桩型特征导致了作用在桩身上的冻拔力明显削弱<sup>[4-6]</sup>。当冻土-混凝土界面的法向拉力超过界面抗拉强度时, 混凝土桩与土体的接触面将出现脆性断裂, 作用于桩身上的冻拔力消失, 从而减小桩的冻拔效应<sup>[7]</sup>。因此, 桩-土界面的抗拉强度对锥形桩冻拔力的控制有重要影响。

目前针对冻土与基础界面抗拉强度方面的研究成果较少, 而在冻土抗拉强度方面的研究较多, 并取得了较为丰富的研究成果。沈忠言等<sup>[8]</sup>通过单轴抗拉试验对饱水冻结黄土的峰值应力等方面进行了分析; 彭万巍<sup>[9]</sup>通过对冻结黄土进行单轴拉伸试验, 分析了应变率和温度对冻土抗拉强度的影响规律; CHRIST et al<sup>[10]</sup>通过开展室内试验, 基于试验数据对抗拉强度与不同因素的关系建立了数学模型; 黄星等<sup>[11]</sup>对不同温度下的不同土样进行巴西劈裂抗拉试验并对其抗拉强度进行了对比分析; AKAGAWA et al<sup>[12]</sup>通过试验对高温冻土抗拉强度形成机理进行了深入分析, 并探究了抗拉强度与孔隙冰含量的关系。关于冻土与结构物界面的抗拉强度, 丁靖康等<sup>[13]</sup>指出冻土与基础界面间的抗拉冻结强度值与土样、含水率、温度、加载速率以及基础粗糙度有关, 但文中仅给出定性的解释, 并没有根据试验数据对其进行定量分析; 高晓静等<sup>[14]</sup>开展了封闭状态下冻结粉土-混凝土界面区抗拉强度正交试验, 发现含水率、温度及干密度对界面抗拉强度的影响权重不同。

以往的研究成果多聚焦于封闭条件下的冻土-混凝土界面抗拉强度开展研究, 对开敞系统下的冻土-

收稿日期: 2024-01-11 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20240017

基金项目: 国家自然科学基金(52178340)

作者简介: 孙铁成(1974—), 男, 教授, 研究方向为冻土区岩土工程。E-mail: sjz\_sti@stdu.edu.cn

孙铁成, 杨逸, 杨茜, 等. 开敞系统中冻土-混凝土界面抗拉强度试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 92-98.

混凝土界面抗拉强度研究较少。然而,实际工程中的混凝土-冻土接触面处于地下水补给的开敞环境中,在常温土-混凝土界面区向冻土-混凝土界面区演变的过程中,水分必将向接触面附近的土体内汇聚,且土体含水量将多于无地下水补给的封闭环境,最终导致接触面处的冰含量较封闭环境有所增加。根据现有研究成果<sup>[13-17]</sup>可知,冻土-混凝土接触面冻结强度与接触面附近土的冰含量以及冰胶结强度密切相关。为使冻土-混凝土界面区试样拥有尽可能接近真实状态的水分迁移形态,开展了冻土-混凝土界面有水分补给条件下的抗拉强度试验,对不同影响因素下冻土-混凝土界面的抗拉强度变化规律进行分析,以期为寒区桩基础受力分析和冻害机理研究提供参考。

## 1 冻土-混凝土界面抗拉强度试验

### 1.1 试验方法

借鉴冻土拉伸中的直接拉伸法,自行设计了拉伸装置,详细构造如图 1 所示。装置包括可拆卸的圆柱形拉伸试样盒、带有加载挂钩的底板、滑轮、应变控制式转动装置等。采用应变控制式转动装置对拉伸试样施加固定方向的匀速拉伸,并利用拉力传感器对接触面拉力进行实时测定并记录。

### 1.2 试验材料

由于粉质黏土的冻胀敏感性较强,对试验的冻结效应有凸显作用,因此选取粉质黏土作为冻土-混凝土界面抗拉强度的试验研究对象。试验所用土料取自河北省石家庄市(北纬 38°1'33"、东经 114°38'41"、海拔 65 m),土样基本物理性质如表 1 所示。

表 1 土样基本物理性质表

塑限/ %	液限/ %	最优含 水率/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	冻结 温度/℃	粉质黏土不同粒径粒度分布/%			
					<0.075 mm	0.075~0.25 mm	0.25~1 mm	>1 mm
13.9	24.2	16.6	1.91	-0.25	52.8	17.3	19.7	10.2

以往学者多采用预制齿形或半圆形凹槽来控制混凝土粗糙面,为还原工程中界面的随机形态,试验采用带有现浇特征的预制混凝土开展后续试验。试验选用 PO42.5R 水泥,通过试配发现,可通过水灰比(即水与水泥质量比)的改变来控制粗糙度,随着水灰比的减小,粗糙度呈现增长趋势。试验设计了水灰比分别为 0.35、0.40、0.50、0.65 这 4 种水平的粗糙接触面,其粗糙度分别记为  $R_{0.35}$ 、 $R_{0.40}$ 、 $R_{0.50}$  与  $R_{0.65}$ 。试验中的水泥砂浆利用水泥:砂=1:3(质量比)并搭配适量粗颗粒砾石的混合料加水搅拌而成。

### 1.3 试样制备及试验设计

试验采用的土样尺寸为  $\Phi 40$  mm $\times$ 30 mm,混凝土块尺寸为  $\Phi 61.8$  mm $\times$ 20 mm。试样参考《铁路工程土工试验规程 TB 10102—2023》采用击实法制备。试样制备及试验过程如下:

(1)将预制的混凝土块放入模具内,利用分层刮毛法将固定含水率的土填入上方,用击实锤夯实,得到常温土-混凝土界面试样。

(2)将试样放入自行设计的开敞环境试验槽中,竖向埋置在与试样土性质相同的母体土中上部位置,拉伸试样及试验槽土体装填如图 2 所示。将上下冷浴盘设置为 1℃,对试验母体土与试样进行恒温处理。

(3)待试验槽内部温度恒定后,开启自下而上的无压补水并对其进行自上而下的单向冻结,待试样以下 2 cm 位置达到负温后停止补水冻结并取出试样,包好保鲜膜放入温控箱(控温精度  $\pm 0.1$ ℃),设置试验所需温度并恒温 24 h,得到冻土-混凝土界面试样。

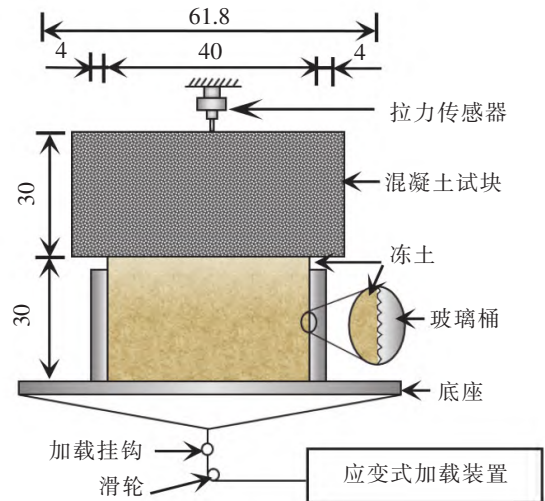


图 1 冻土-混凝土界面区拉伸装置(单位:mm)



图 2 冻土-混凝土界面区拉伸试样及试验槽

(4)将冻土-混凝土界面试样放入拉伸装置中,在冷冻舱(控温精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )内开展试验温度下的界面冻结抗拉强度试验,拉伸位移施加速率取 $2.4\text{ mm/min}$ 。

在冻土与结构物相互作用方面,接触面粗糙度 $R$ 、冻结温度 $T$ 、土样含水率 $\omega$ 、土体干密度 $\rho_d$ 等是影响桩基础与土体接触面力学性能的重要影响因素<sup>[14,16-17]</sup>,在实际工程中较为常见,因此选取这4个条件作为试验因素,采用正交试验法研究各因素对冻土-混凝土界面冻结抗拉强度的影响规律及作用水平。为了减小误差影响,每组实验进行3次平行试验,取试验平均值作为该条件下的冻土-混凝土界面抗拉强度。试验设计的四因素四水平正交表如表2所示。

表 2 正交试验因素水平表

水平	土样含水率/%	干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	接触面粗糙度	冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	11	1.60	$R_{0.35}$	-2
2	14	1.65	$R_{0.40}$	-4
3	17	1.70	$R_{0.50}$	-6
4	20	1.80	$R_{0.65}$	-10

## 2 试验结果分析

冻土的抗拉强度主要来源于孔隙冰的抵抗拉伸作用<sup>[1]</sup>,冻土-混凝土界面与冻土抵抗拉伸的机制不同,其抗拉强度主要来源于界面冰胶结力的抵抗拉伸作用<sup>[13]</sup>。因单位面积上孔隙冰的抗拉能力远高于冰胶结作用力,故冻土抗拉强度远高于界面冻结抗拉强度。冻结温度由 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 向 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化的过程中,界面冻结抗拉强度约为粉质黏土的 $1/7$ <sup>[14]</sup>,因此在试验中冻土-混凝土界面会早于冻土被拉坏,可确保所测强度为界面拉伸强度。

### 2.1 极差、方差分析

通过对正交试验结果进行极差分析,得到各试验因素的优水平、最优水平组合及主次顺序,结果列于表3。利用方差分析法对试验结果进一步分析,考察4个因素在各水平下的效应是否具有显著性,分析结果见表4。

表 3 极差分析表

水平	土样含水率 A	干密度 B	接触面粗糙度 C	冻结温度 D	误差列
K1	484.2	1 441.3	1 653.9	973.7	1 318.6
K2	1 296.7	1 274.7	1 467.7	1 161.9	1 474.4
K3	1 520.3	1 436.9	1 405.3	1 411.7	1 193.6
K4	2 102.5	1 250.8	876.8	1 856.4	1 417.1
R	1 618.3	190.5	777.1	882.7	280.8
优水平	4	1	1	4	—

表 4 方差分析表

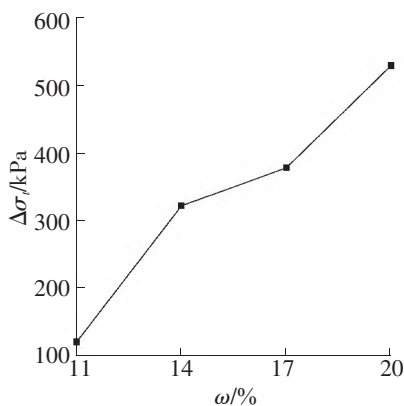
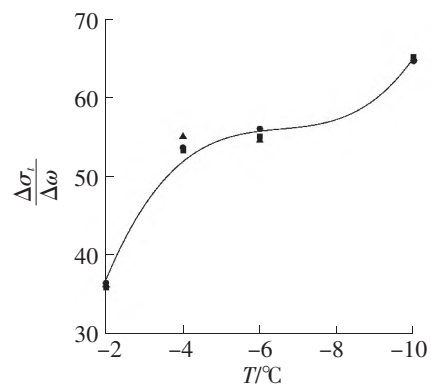
变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	$F_{\alpha}$	显著水平
土样含水率 A	336 926.36	3	112 308.79	29.67	$F_{0.10(3,3)} = 29.46$	***
干密度 B	7 848.65	3	2 616.22	0.69	$F_{0.10(3,3)} = 5.39$	—
接触面粗糙度 C	83 295.35	3	27 765.12	7.34	$F_{0.10(3,3)} = 5.39$	**
冻结温度 D	109 306.93	3	36 435.64	9.63	$F_{0.10(3,3)} = 5.39$	**
误差列	11 355.32	3	3 785.11			

由表 3 可知,4 种不同试验因素对界面冻结抗拉强度影响程度的顺序为:土样含水率>冻结温度>接触面粗糙度>干密度。优组合是  $A_4B_1C_1D_4$ ,即在高含水率、低温度、高粗糙度、低干密度的情况下,界面冻结抗拉强度达到最高。

由表 4 可知,含水率对界面冻结抗拉强度有强显著的影响;冻结温度和接触面粗糙度对界面冻结抗拉强度有较为显著的影响;干密度对试验结果影响程度很低,这与极差分析的结果相吻合。

## 2.2 土样含水率对界面冻结抗拉强度的影响

图 3 为相同含水率下界面冻结抗拉强度均值曲线图。为深入研究单位含水率对冻结抗拉强度变化影响程度与冻结温度的关系,绘制不同温度下单位含水率的冻结抗拉强度变化曲线如图 4 所示,其中  $\Delta\sigma_t$  为不同冻结温度下界面抗拉强度的最大值与最小值之差,对应的土样含水率差值为  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\sigma_t/\Delta\omega$  为不同冻结温度下单位含水率的界面抗拉强度变化值。

图 3  $\Delta\sigma_t$  与  $\omega$  的曲线图 4  $\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta\omega}$  与  $T$  的曲线

由图 3、图 4 可知:

(1)随着土样含水率的增加,界面冻结抗拉强度均值呈现逐步增强的趋势。通过文献[13]得出,基础周围土体冻结时,土颗粒与基础表面间的水膜胶黏连结转变成冰胶黏连结,因而冻土-混凝土界面的抗拉强度主要受界面区冰胶结力影响。在低温状态下,随着土样含水率的增加,界面区中有更多的自由水转变为冰晶,致使冰胶结力逐渐增大,最终体现为界面冻结抗拉强度的不断增加。

(2)在相同接触面粗糙度的条件下,随着冻结温度的降低,土样含水率对界面冻结抗拉强度的影响程度逐步增强。由图 4 可看出,在冻结温度偏高时,单位含水率的冻结抗拉强度变化值  $\Delta\sigma_t/\Delta\omega$  比较小,随着冻结温度的降低,此值逐渐增大。这是由于在冻结温度较高的情况下,土中仅有少量的自由水向界面迁移并转化为冰晶;随着温度持续降低,自由水向界面区迁移的水量逐步增多,导致界面区的冰晶含量与冻结温度高的情况相比有所增加,冰胶结力急剧增大,进而体现为冻结抗拉强度的提高。因此,土样含水率对界面冻结抗拉强度的影响程度随着冻结温度的降低呈现增强的趋势。



### 2.3 冻结温度对界面冻结抗拉强度的影响

图 5 为同一温度下冻结抗拉强度均值曲线图。为深入研究单位冻结温度对界面冻结抗拉强度变化影响程度与土样含水率的关系,不同含水率下单位冻结温度的抗拉强度变化曲线如图 6 所示,其中,  $\Delta\sigma_t$  为不同含水率下冻结抗拉强度的最大值与最小值之差,对应的冻结温度差值为  $\Delta T$ ,  $\Delta\sigma_t/\Delta T$  为不同含水率下单位冻结温度的抗拉强度变化值。

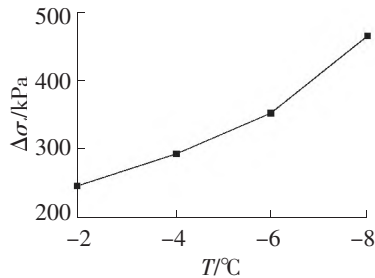


图 5  $\Delta\sigma_t$  与  $T$  的曲线

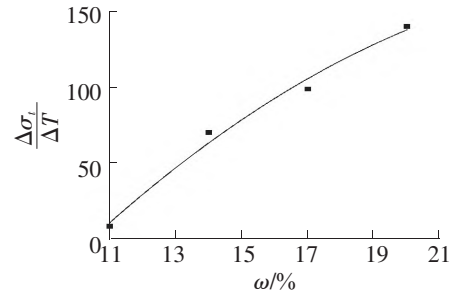


图 6  $\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta T}$  与  $\omega$  的曲线

由图 5、图 6 可知:

(1) 随着冻结温度的降低,界面冻结抗拉强度均值呈现逐步上升的趋势。随着冻结温度的降低,由界面区自由水转变为冰晶的含量逐步增多,且冰晶抵抗拉伸的能力也得到增强,导致冰胶结力增大,即界面冻结抗拉强度增大。

(2) 在相同接触面粗糙度的条件下,随着土样含水率的增加,冻结温度对界面抗拉强度的影响更加显著。由图 6 可看出,在土样含水率较低时,单位冻结温度的抗拉强度变化值  $\Delta\sigma_t/\Delta T$  比较小,随着含水率的增加,其值逐渐增大。在低温环境中,土样含水率的增加会使更多自由水向界面区迁移并形成冰晶,界面处的冰胶结力因冰晶含量的增多而增大,进而体现为界面冻结抗拉强度的增大。因此,冻结温度对界面冻结抗拉强度的影响程度随着含水率的增加呈现增强的趋势。

### 2.4 接触面粗糙度对界面冻结抗拉强度的影响

图 7 为同一粗糙度下冻结抗拉强度均值的曲线图。为深入研究单位粗糙度对界面冻结抗拉强度变化的影响程度与土样含水率的关系,绘制不同土样含水率下单位粗糙度的界面冻结抗拉强度变化曲线如图 8 所示,其中,  $\Delta\sigma_t$  为不同含水率下界面冻结抗拉强度的最大值与最小值之差,对应的接触面粗糙度差值为  $\Delta R$ ,  $\Delta\sigma_t/\Delta R$  为不同含水率下单位粗糙度的界面冻结抗拉强度变化值。

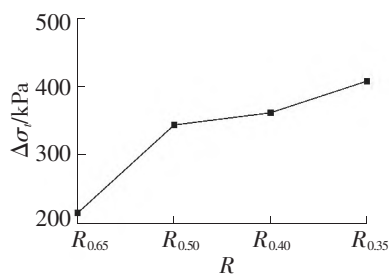


图 7  $\Delta\sigma_t$  与  $R$  的曲线

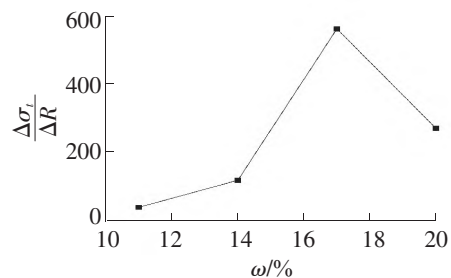


图 8  $\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta R}$  与  $\omega$  的曲线

由图 7、图 8 可知:

(1) 随着接触面粗糙度的不断增加,界面冻结抗拉强度均值逐步提高。冻土-混凝土接触面粗糙度由混凝土表面的起伏程度决定,是影响界面区黏聚力及冰胶结力的重要因素。随着接触面粗糙度的不断提高,冻土与混凝土的实际接触面积逐步增加,因而在补水过程中界面位置处的冰胶结量得到增加,最终表现为界面冻结抗拉强度随着接触面粗糙度的不断提升而逐步增大。

(2) 在相同的冻结温度作用下,土样含水率的变化制约着接触面粗糙度对界面冻结抗拉强度的影响

规律,即存在临界土样含水率,当土样含水率位于临界含水率两侧时,接触面粗糙度的增加对界面冻结抗拉强度增幅的影响程度不同。在冻结温度和接触面粗糙度相同的状态下,位于界面位置处的冰晶含量会随着土样含水率的增大而增多。

由图 9 可知,当土样含水率小于临界含水率时,在接触面上因水分迁移而增多的冰晶不足以影响界面的起伏程度(如图 9(a)所示),此时接触面粗糙度对界面冻结抗拉强度的影响随着含水率的增长呈快速增长趋势;当土样含水率大于临界含水率后,增多的冰晶可能改变界面的起伏程度,使得界面起伏程度变得平缓,从而减小了接触面粗糙度(如图 9(b)所示),进而削弱了粗糙度对界面冻结抗拉强度的影响程度。所以当土样含水率小于临界含水率时,接触面粗糙度的增加对界面冻结抗拉强度增加幅度的影响程度随着含水率的增长呈正相关;当含水率大于临界值时,接触面粗糙度的增加对抗拉强度增加幅度的影响程度随着含水率的增长呈负相关。

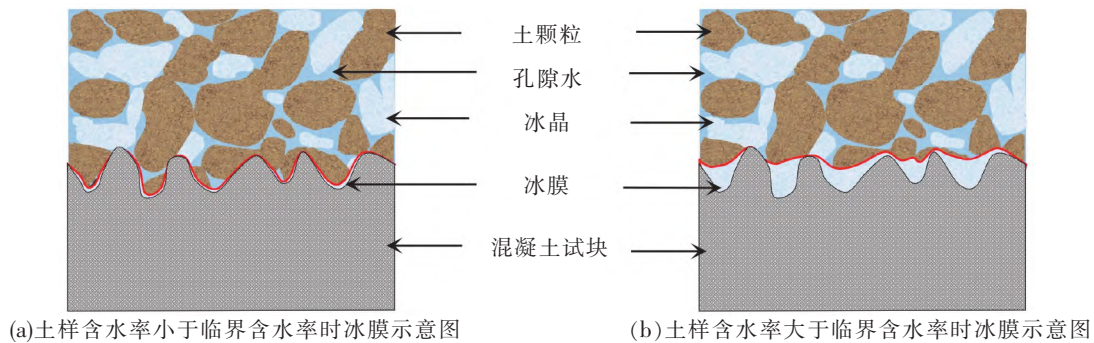


图 9 不同土样含水率界面冰膜示意图

### 3 结论

通过对冻土-混凝土界面抗拉强度进行正交试验数据分析,得到了不同因素对界面抗拉强度的影响程度以及变化规律,得出以下结论:

(1) 试验因素对界面区冻结抗拉强度影响的主次顺序为土样含水率 > 试验温度 > 接触面粗糙度 > 干密度,土样含水率对界面冻结抗拉强度具有强显著影响,试验温度和接触面粗糙度的影响次之,干密度影响不显著。

(2) 土样含水率的增大、试验温度的降低以及接触面粗糙度的增加均可提升界面冻结抗拉强度,且在 high 含水率、低温度、高粗糙度、低干密度的情况下,界面抗拉强度达到最高。

(3) 存在临界土样含水率,当土样含水率小于临界含水率时,接触面处因水分迁移而产生的冰晶不足以影响界面的起伏程度,接触面粗糙度对界面冻结抗拉强度变化的影响程度随着含水率的增长呈正相关;当含水率大于临界值时,接触面处的冰晶可能使界面起伏程度变得平缓,接触面粗糙度对抗拉强度增加幅度的影响程度随着含水率的增长呈负相关。

### 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,王旭,刘德仁,等. 青藏铁路多年冻土地基输电塔塔棒桩基稳定性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊 2):4258-4263.
- [3] 王腾飞,刘建坤,邵博文,等. 螺旋桩冻拔特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(6):1084-1092.
- [4] 王力生,张云芳,刘鸿绪. 斜面基础防切向冻胀力的受力分析[J]. 低温建筑技术,1995,17(3):30-32.
- [5] OLGA T. Reduction in tangential frost heaving forces by the pile eometry change[J]. Architecture and Engineering, 2017,2(1):61-68.
- [6] TRETAKOVA O, YUSHKOV B. Inverted-cone piles for transpot constructions in seasonally freezing soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering,2017,54(3):173-176.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

- [8]沈忠言,彭万巍,刘永智. 冻结黄土抗拉强度的试验研究[J]. 冰川冻土,1995,17(4):315-321.
- [9]彭万巍. 冻结黄土抗拉强度与应变率和温度的关系[J]. 岩土工程学报,1998,20(3):31-33.
- [10]CHRIST M,KIM Y C. Experimental study on the physical-mechanical properties of frozen silt[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2009,13(5):317-324.
- [11]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.
- [12]AKAGAWA S,NISHISATO K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe[J]. Cold Regions Science & Technology,2009,57(1):13-22.
- [13]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.
- [14]高晓静,孙铁成,李晓康,等. 冻结作用下粉土-混凝土接触面抗拉强度试验研究[J]. 冰川冻土,2020,42(2):499-507.
- [15]魏厚振,周家作,韦昌富,等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(9):2547-2552.
- [16]POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction material[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [17]石泉彬,杨平,谈金忠,等. 冻土与结构接触面冻结强度压桩法测定系统研制及试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):139-147.

## Experimental Study on Tensile Strength of Frozen Soil-concrete Interface in Open System

SUN Tiecheng<sup>1,2,3</sup>, YANG Yi<sup>3</sup>, YANG Qian<sup>3</sup>, DONG Chuangqi<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structure, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway

Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

4. China Construction Science and Industry Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In pile foundation engineering in cold regions, the strength of frozen soil-concrete interface has an important influence on the stress state of pile foundation. The tensile strength orthogonal test of the frozen soil-concrete interface zone was carried out under the condition of open system. The range analysis of variance method was used to clarify the primary and secondary order of the influence of four test factors, namely interface roughness, soil moisture content, test temperature and dry density, on the frozen tensile strength of the interface. The test results show that the increase of soil moisture content, the decrease of test temperature and the increase of contact surface roughness can continuously improve the frozen tensile strength of the interface. There is a critical moisture content in the soil sample. When the moisture content is located on both sides of the critical moisture content, the roughness of the contact surface changes to different degrees due to the ice film formed by the water migration, which leads to different laws in the impact of the increase in contact surface roughness on the increase in frozen tensile strength of the interface.

**Key words:** frozen soil-concrete interface; frozen tensile strength; open system; moisture migration; orthogonal test