

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0157

WANG Haihang, ZHOU Yang, ZHAO Xiaodong, et al. Research status and prospect of tensile strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1807-1819. [王海航, 周扬, 赵晓东, 等. 冻土抗拉强度研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1807-1819.]

## 冻土抗拉强度研究现状与展望

王海航<sup>1</sup>, 周 扬<sup>2</sup>, 赵晓东<sup>1</sup>, 王建州<sup>1</sup>, 周国庆<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 全面掌握冻土抗拉强度研究现状是进一步深化研究的基础。首先, 分类介绍了目前可用于冻土抗拉强度测试的各典型方法, 详细阐述了不同测试方法的试验条件、试样形式和受力机理, 对比列举了典型抗拉强度测试方法优缺点。其次, 归纳总结了基于不同试验方法已进行的研究工作和不足。然后, 全面分析了温度、含水量、加载(变形)速率、土质及试样尺寸等影响因素对冻土抗拉强度变化规律影响的最新研究进展。最后, 提出发展并完善冻土抗拉强度研究方法和体系, 增加高温冻土抗拉强度测试研究, 从而获得更加准确模拟冻土张拉破坏行为的展望。指出应结合冻土微观结构和数字图像技术研究手段, 深入揭示冻土抗拉强度形成内因和张拉破坏机制。阐述以多影响因素试验为基础, 探寻更为完善的冻土抗拉强度预测方法。同时, 拓展冻土抗拉强度的现场原位测试研究, 加强室内外双轨并行式研究思路。通过对国内外研究现状及发展趋势的分析, 为冻土抗拉强度试验研究、冻胀理论模型完善、寒区岩土工程设计和人工冻结加固工程等提供参考和指导。

**关键词:** 冻土; 抗拉强度; 直接拉伸; 间接拉伸; 力学特性

**中图分类号:** TU445   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1807-13

### 0 引言

冻土作为一种温度低于0℃且含有冰的多孔多相介质, 广泛分布于地球表层。全球陆地面积的70%分布着不同形式的冻土, 我国国土面积的75%分布着对工程建设影响较大的天然冻土<sup>[1]</sup>。此外, 随着深部地下空间的开发、能源的开采以及污染场地的净化治理, 人工冻结法应运而生并迅速发展, 人工冻土体量日渐增加, 冻土力学问题也日益显著<sup>[2-4]</sup>。

在传统土力学与工程实践中, 由于土的松散特性导致其抗拉强度远低于抗压和抗剪强度。因此未冻土抗拉强度往往被忽略不计。由于冻结作用土体内部孔隙水相变成冰, 原本松散的土颗粒被冰晶胶结, 土体的抗拉强度特性也由此得到提升<sup>[5-6]</sup>。冻土抗拉强度作为冻土力学研究的重要参数之一, 在寒区工程和人工冻结建设中有广泛的应用。

例如冻结壁强度设计<sup>[7]</sup>、土石坝心墙开裂<sup>[8]</sup>、热融滑塌体顶部张拉裂隙<sup>[9-10]</sup>、冬季路面裂缝的形成和输变电工程的基础冻拔等诸多冻害均与该指标密切相关<sup>[11-12]</sup>。同时, 高温冻土抗拉强度又是冻胀理论中分凝冰形成的重要判据参数<sup>[13-14]</sup>。由于目前对冻土抗拉强度的研究仍然较少, 可参考数据有限。因此, 归纳现阶段冻土抗拉强度研究成果, 系统掌握冻土抗拉强度特性, 对深化冻土力学研究以及预防冻土工程灾害具有重要的理论价值和防灾减灾意义。

本文阐述了国内外冻土抗拉强度研究现状, 从测试方法、影响因素和变化规律等角度归纳总结了所取得的研究成果。这些成果在冻土抗拉强度理论研究与应用中起到了重要的作用, 但仍存在较大的发展空间。最后, 结合冻土抗拉强度研究特点以及理论研究和工程建设需要, 对冻土抗拉强度

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271096;41772338)资助

作者简介: 王海航, 博士研究生, 主要从事冻土物理力学与工程研究. E-mail: wangstd@163.com

通信作者: 周国庆, 教授, 主要从事特殊土物理力学特性与工程效应研究. E-mail: gqz@cumt.edu.cn

测试方法、分析角度和未来发展方向进行展望。

### 1 直接拉伸法

直接拉伸法,顾名思义就是直接在冻土试样的两端按照一定的速率施加(等效)拉伸荷载至试样断裂,记录该过程的峰值拉力,通过测算试样破裂的峰值拉力以及破裂面面积,通过简单计算即可获得冻土抗拉强度。直接拉伸法根据应力条件又可简单划分为:单轴拉伸法和三轴拉伸法。

#### 1.1 单轴拉伸法

单轴拉伸法是测定土体抗拉强度的有效试验方法之一,其优点在于:试验设备简单及受力机理与断裂面应力分布明确。而难点在于:试样和拉伸装置的有效联结以及试样形状的合理选取。针对该问题,研究人员相继创新性提出采用粘接<sup>[15]</sup>、拉锚<sup>[16]</sup>、增阻<sup>[17]</sup>及模具夹持<sup>[18-19]</sup>等方法解决这一困难,并由此衍生多种试样形式。包括:标准的圆柱型以及哑铃型和X字型等异形试样形式,常见的试样截面形状如图1所示。

采用直接拉伸法测算冻土抗拉强度的计算形式如下<sup>[26]</sup>:

$$\sigma_t = T'/A \tag{1}$$

式中: $\sigma_t$ 为冻土抗拉强度,Pa; $T'$ 为试样断裂时有效峰值拉力,N; $A$ 为试样断裂面面积,m<sup>2</sup>。

基于单轴拉伸法,国内外学者开展了不同影响

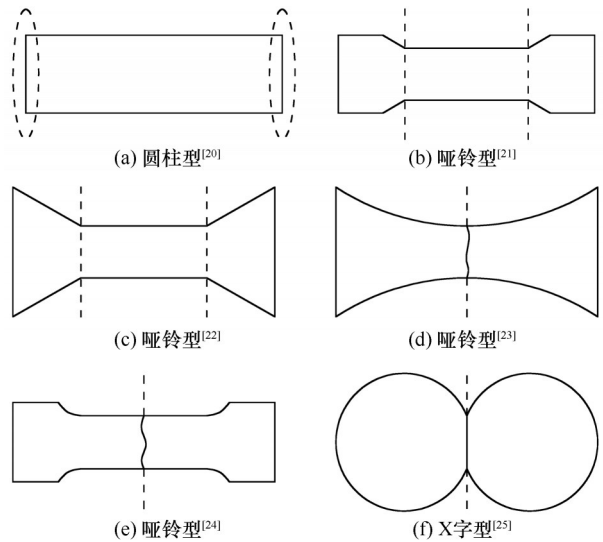


图1 试样截面形式

Fig. 1 Section shape of specimen

因素下的冻土抗拉强度测试,如表1所示。

由表1可知,基于单轴拉伸法测试冻土抗拉强度的研究,多集中于饱和低温冻土或最优含水量状态下低温冻土,非饱和状态的低温冻土和高温冻土抗拉强度涉及较少。土质均以粉土、黄土(黏土)以及粉质黏土等可塑性较强的细粒土为主,冻结粗粒土以及混合土抗拉强度少有学者采用单轴拉伸法进行研究。而加载速率根据拉伸装置特点有不同的选择,但基本以2 mm·min<sup>-1</sup>作为加载速率区间中心或直接选择该速率作为试验加载速率。

表1 单轴拉伸法测试冻土抗拉强度汇总

Table1 Summary of tensile strength of frozen soil tested by uniaxial tensile method

土质	含水量/%	温度范围/℃	加载速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	研究内容	文献来源
粉土	—	0~-57	—	单轴拉伸法测试冻土抗拉强度可行性及强度与温度和加载速率关系	[27]
黄土	饱和	-2、-5、-10	0.005~20	分析饱水冻结黄土峰值应力、破坏应变和破坏时间特性	[28]
黄土	饱和	-5、-10、-15	0.168~9.72	应变率及温度对冻结黄土抗拉强度的影响规律	[29]
黄土	饱和	-2、-5、-10	—	冻结黄土抗拉强度与应变率和温度的关系	[30]
黏土	饱和	0~-2	0.34、2.3	高温冻土抗拉强度形成机理及抗拉强度与孔隙冰含量的关系	[31]
粉质黏土	14~25	-2~-20	1	建立抗拉强度与温度和初始含水量关系的数学模型	[32]
粉砂	12	-2~-20	1	分析橡胶掺入量对粉砂土强度影响规律以确定最佳混合比	[33]
粉土	13~20	-2~-10	2.4	探究冻结作用下土与结构接触面抗拉强度的影响因素及变化规律	[34-35]

#### 1.2 三轴拉伸法

三轴拉伸法是另一种直接拉伸法,根据应力路径的不同可分为三轴拉伸和三轴伸长试验。其优点在于:能够模拟试样真实应力状态。而难点在于:试验装置和原理相较复杂困难,试验过程中往往会出现纯拉断、先剪切伸长后拉断以及纯剪切破

坏三种形式,每种破坏形式对于试样自身强度、轴/围压环境以及应力路径具有强烈的依赖性,试验结果稳定性并不理想且限于设备等原因试验过程现象难以观测<sup>[36]</sup>。三轴拉伸试验通过轴向卸载或增加围压使试样伸长等效代替在端部直接施加拉力作用。在当需要施加反向拉力时,仍要关注试样端

面和拉伸装置的有效联结问题,限于三轴试验系统客观条件,试样通常采用标准圆柱形并选用端面胶黏连接。因此,三轴拉伸法在土体抗拉强度研究使用较少。三轴拉伸法测定冻土抗拉强度需要借助冻土三轴仪,力学模型如图2所示。

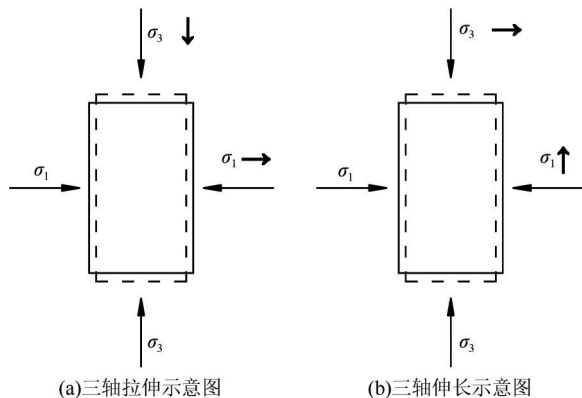


图2 三轴应力拉伸力学模型图

Fig. 2 Mechanical model diagram of triaxial stress tensile

采用三轴拉伸法测定冻土库伦抗拉强度的表达式如下<sup>[37]</sup>:

$$\sigma_{tl} = c_l + \sigma \tan \varphi_l \quad (2)$$

式中: $\sigma_{tl}$ 为冻土三轴抗拉强度,Pa; $c_l$ 为抗拉黏聚力,Pa; $\varphi_l$ 为抗拉内摩擦角,(°)。

目前,采用三轴拉伸法测试冻土抗拉强度的文献数据有限。陈有亮<sup>[38-39]</sup>等对上海人工冻结软黏土进行三轴伸长试验,分析了保持轴压大小及加载速率大小对抗拉强度的影响,得出试样所受轴压和围压对抗拉强度起到一个弱化作用的结论并分析了原因。通过对抗拉强度与加载速率进行线性回归,获得了抗拉强度随加载速率增加而增加,保持轴压越高抗拉强度增长速率越小的结论,并得到了模型参数。宋炳堂等<sup>[40]</sup>通过对兰州粉土进行常规三轴压缩和加卸载试验,分析了应力-应变曲线、体应变曲线的变化规律,确定了不同围压及不同加卸载循环次数下,高温冻结粉土的反弹模量及其损伤变化规律,在偏应力-平均应力平面内建立了一个新的强度准则并可基于该准则预测高温冻土的各向同性抗拉强度值,即为子午面内强度包线与平均应力轴交点。

## 2 间接拉伸法

区别于直接拉伸法,间接拉伸法一般是通过其他荷载形式:如外部挤压荷载、弯折荷载以及内部压胀荷载等,使试样内部产生等效拉应力后出现拉

伸破裂。经过弹(塑)性力学假设后,选用恰当的理论公式计算后获得冻土抗拉强度。间接拉伸法可简单划分为:径向压裂法、轴向压裂法、土梁弯折法和气压劈裂法等。两类方法殊途同归,最终均是使冻土试样产生拉伸破坏,再通过换算得到冻土抗拉强度。

### 2.1 径向压裂法

径向压裂法亦称巴西劈裂法,根据垫条有无和形式可分为垫条、无垫条以及弧形夹具劈裂法。该方法最初主要应用于岩石和混凝土等脆性材料的抗拉强度测试,后被逐渐引用到土体抗拉强度试验中。其优点在于:装样便捷、试验可操作性强,只需借助万能试验机和辅助垫条即可,也因此逐渐成为间接拉伸法中广为接受的主流方法之一。而难点在于:荷载点容易出现应力集中,试样断面形式常与理论推导过程假设不一致,力学模型如图3所示。

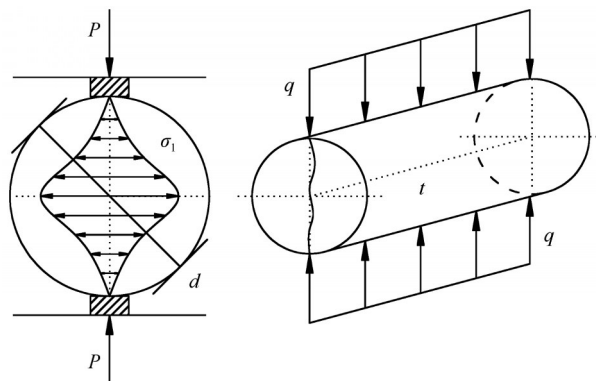


图3 径向压裂力学模型图

Fig. 3 Mechanical model diagram of radial splitting method

径向压裂法常用试件有圆柱体、立方体和长梁三类,其中尤以圆柱体试样最为常见。抗拉强度需借助线弹性理论求解,在半无限体应力求解基础上获得平板内的应力分布特征。理论推导过程不再赘述,根据国际岩石力学学会(ISRM)建议,径向压裂法采用最大拉应力准则计算得出试样的抗拉强度为<sup>[41]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (3)$$

式中: $\sigma_t$ 为冻土抗拉强度,Pa; $P$ 为峰值压力,N; $d$ 为试样直径,m; $t$ 为试样轴向厚度,m。

基于径向压裂法,国内外学者开展了不同影响因素下的冻土抗拉强度测试,如表2所示。

由表2可知,基于径向压裂法测试冻土抗拉强度的研究,也多集中于饱和和低温冻土或最优含水量



表2 径向压裂法测试冻土抗拉强度汇总

Table 2 Summary of tensile strength of frozen soil tested by radial splitting method

土质	含水量/%	温度范围/℃	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	研究内容	文献来源
硅砂	饱和	-6	—	冻土抗拉强度与加载速率、温度以及试样尺寸关系	[42]
黄土	饱和	-2、-5、-10	0.005~20	径向压裂法测试冻土抗拉强度可行性及强度与温度和加载速率关系	[43]
黄土	饱和	-2~-15	0.005~20	试样长度对径向压裂法测定结果的影响及计算方法修正	[44]
黏土	30	-7、-12、-17	—	径向压裂法测试冻土抗拉强度可行性及强度与温度和土质关系	[45]
砂土	16				
粉质黏土	14~25	-1~-24	1	建立抗拉强度与温度和初始含水量关系的数学模型	[46]
粉土	饱和	-0.1~-2	2	高温冻土抗拉强度与未冻水含量和体积含冰量的定量关系	[47]
粉土	富冰	-0.5~-2	0.1、1.25、4	高温冻土抗拉强度与温度和加载速率的关系	[48]
膨胀土	21.7~25.7	-2~-15	0.2~20	温度、加载速率、干密度以及含水量对抗拉强度的影响规律	[49]
粉质黏土	最优含水量	-1~-20	8.25	分析冻土压裂强度差异及抗拉强度随土质特性和温度的变化规律	[50]
黄土、砂土					
混杂岩土	25	-10、-20、-30	0.02	分析抗拉强度特性与温度和含水量关系以及混杂岩土破裂面特征	[51-52]
粉质黏土	3.5~21	0~-12	1	分析冻土抗拉强度与初始含水量和温度的关系	[53]
粉土	饱和	-1、-6、-10、-15	0.3、1、10、50、100	分析试样尺寸、温度、加载速率和预制裂缝对抗拉强度影响规律	[54]

状态下低温冻土,非饱和状态的低温冻土和高温冻土抗拉强度涉及仍然较少。土质均以粉土、黄土(黏土)以及粉质黏土等可塑性较强的细粒土为主。温度、含水量(含冰量)及加载速率是冻土抗拉强度的主要研究变量,此外也涉及试样尺寸和干密度等次要变量。整体而言,相较其他测试方法采用径向压裂法研究冻土抗拉强度较为广泛,但仍存在前述的客观不足。

2.2 轴向压裂法

轴向压裂法又称双面冲压法,该方法比照径向压裂法推出,在原理上与径向压裂法相似,都是通过对试样施加挤压荷载使其产生等效拉应力后发生张拉破坏,也同样具有装样便捷、试验可操作性强等优点。该方法与径向压裂法通常视为互补互比的平行方法,轴向压裂法抗拉强度需要借助理想塑性理论和能量法中功-能等量关系求解,根据楔形压缩体以及周围土体进行速度矢量关系化简能量表达式,由数学求极值方法获得,力学模型如图4所示。

采用轴向压裂法测定冻土抗拉强度表达式形式如下<sup>[55]</sup>:

$$\sigma'_i = \frac{P}{\pi(kbh - a^2)}$$

(4)

式中: $\sigma'_i$ 为冻土抗拉强度,Pa; $P$ 为轴向压力,N; $b$ 为试样半径,m; $h$ 为试样高度,m; $a$ 为衬垫半径,m;

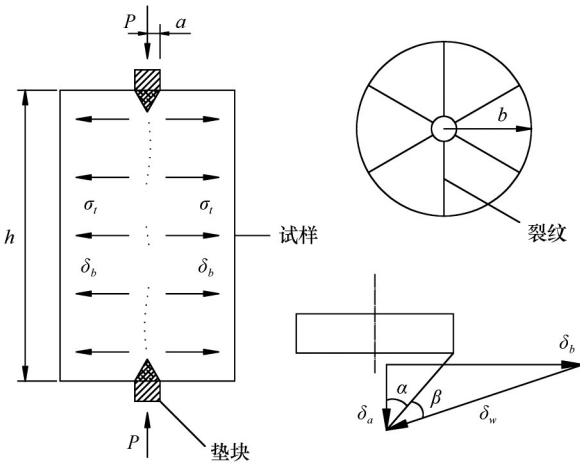


图4 轴向压裂承载力求解

Fig. 4 Solution of bearing capacity of a double punch test

$k$ 为比例系数。

基于轴向压裂法,仅有少数学者开展了不同影响因素下的冻土抗拉强度测试研究。沈忠言等<sup>[56]</sup>采用轴向压裂法对冻结兰州黄土(粉土)抗拉强度进行了分析,探讨了温度、加载速率对轴向压裂法测定结果的影响规律,确定了轴向压裂法作为间接拉伸法测定冻土抗拉强度的可行性。Yin等<sup>[57]</sup>采用正交试验设计通过轴向压裂法对临潼黄土(粉土)抗拉强度进行了分析,对黄土抗拉强度的影响因素进行了权重分析。结果表明,影响黄土抗拉强度的顺序依次为含水量、圆盘直径、干密度、试样制备方法、高径比和加载速率。

### 2.3 土梁弯折法

土梁弯折法包含原理相同的三点弯折法和四点弯折法两种,均是通过万能试验机对试样施加弯折荷载使其产生等效拉应力后发生张拉(断裂)破坏,其优点是:装样便捷且可操作性强。不足之处在于:为了确保试验过程中试样产生断裂拉伸破坏,需要对土梁试样横纵截面尺寸加以控制,因此决定了试验用土量较大同时其内部容易出现缺陷。基于此,研究人员创新性提出采用半圆形截面试样解决这一困难。以四点弯折法为例,试验时试样为跨中受对称集中荷载的简支梁。土梁弯折法抗拉强度需要借助弹性力学纯弯曲梁的弯曲平面假设和纵向纤维假设推导,力学模型如图 5 所示。

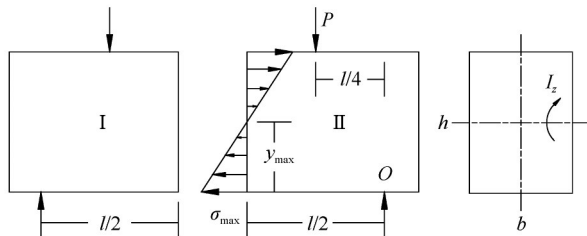


图 5 土梁弯折法试样形式

Fig. 5 Sample form of soil beam bending method

采用土梁弯折法测定冻土抗拉强度表达式形式如下<sup>[58]</sup>:

$$\sigma_t' = \frac{My_{\max}}{I_z} \quad (5)$$

式中: $\sigma_t'$ 为冻土抗拉强度,Pa; $y_{\max}$ 为跨中底面距中性面最远距离,m; $I_z$ 为试样横截面惯性矩,m<sup>4</sup>。

基于土梁弯折法,部分学者开展了不同影响因素下的冻土抗拉强度测试并取得了一些重要的结论。Azmatch等<sup>[59]</sup>采用四点梁弯曲试验研究了接近0℃条件下人工冻土抗拉强度,研究表明:加载速率对微裂纹发育有显著影响,从而影响冻土抗拉强度。抗拉强度和应力-应变行为与温度、变形速率和未冻水含量密切相关。Yamamoto等<sup>[60]</sup>采用三点和四点梁弯曲试验研究了接近0℃条件下人工冻土抗拉强度,探讨了温度、加载速率对梁弯曲法测定结果的影响规律,确定了土梁弯折法作为间接拉伸法测定冻土抗拉强度的可行性。Too等<sup>[61]</sup>采用三点梁弯曲试验研究了冻结砂土的抗拉强度,通过与含裂缝试样的水力压裂对比,互相验证了两类试验方法在抗拉强度测试上的可行性。Liu等<sup>[62]</sup>采用四点梁弯曲试验研究了地铁联络通道内人工冻土的抗拉强度,分析了温度和含水量因素对抗拉强度的影

响规律,进一步验证了该测试方法的可行性。于长一等<sup>[63]</sup>采用细观数值方法,假设细观材料参数符合Weibull分布,宏观材料性能符合线弹性假设,采用损伤模型分别模拟了单轴拉伸试验和四点弯曲拉伸试验。引入非局部化理论,解释了冻土单轴拉伸强度和四点弯曲拉伸强度差异的来源为材料均质度,并定量地给出了材料特征长度和均质度之间的关系。Kolesnikov等<sup>[58]</sup>采用三点梁弯曲试验研究了冻土抗拉强度,研究表明:试验测得抗拉强度极值与裂纹梁横截面拉应力极值不一致。出现了拉应力极值是偏移现象。这意味着,在拉伸应力作用下,材料的破坏不是在最大载荷下发生的。这一结论对土梁弯曲试验拉应力理论计算公式修正具有重要的意义。

### 2.4 液压劈裂法

液压劈裂法包含原理相同的水力劈裂法和气压劈裂法两种,通过液(气)压增压泵对圆柱试样的空心内壁施加压胀荷载,使其产生等效拉应力后发生张拉破坏。液压劈裂法原理较为简单,相比传统抗拉强度测试方法而言,液压劈裂法对于土体,尤其是冻土抗拉强度测试属于新兴试验方法。目前,未见液压劈裂法在冻土抗拉强度测试上的应用,力学模型如图6所示。

液压劈裂法抗拉强度需要借助厚壁圆筒承受内压,选取单元体受力分析,通过弹性力学基本方程求解厚壁应力获得。采用液压劈裂法测定冻土抗拉强度的张拉断裂面正应力计算表达式为:

$$\sigma_\theta = \frac{p_i}{\xi^2 - 1} \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

式中: $\sigma_\theta$ 为冻土抗拉强度,Pa; $p_i$ 为空心圆柱试样内压,Pa; $r_0$ 为试样外半径,m; $r_i$ 为试样内半径,m; $\xi = r_0/r_i$ 为无量纲数。

基于上述各类试验方法的总结与介绍,现对直接拉伸法和间接拉伸法中,典型抗拉强度测试方法进行归纳对比,如表3所示。

## 3 影响因素(变化规律)

冻土的抗拉强度受温度、含水量、变形(加载)速率、土质级配、试样尺寸以及压实度和制样方法等诸多因素影响,且各影响因素之间相互耦合并不独立。因此,对冻土抗拉强度的分析应遵循从全局到局部、从宏观到微观的逻辑思路,才能科学准确地了解冻土抗拉强度特性。下面从室内试验控制

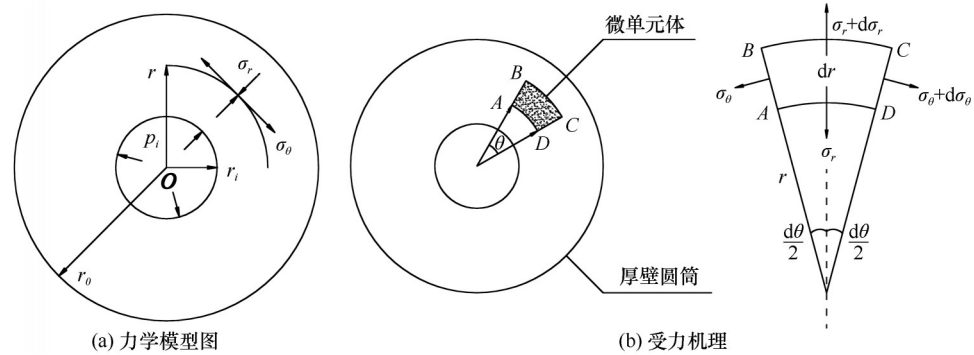


图6 液压劈裂力学模型图

Fig. 6 Mechanical model diagram of hydraulic fracturing

表3 典型抗拉强度测试方法对比

Table 3 Comparison of typical tensile strength test methods

方法分类	试验方法	试样截面	优缺点
直接拉伸法	单轴拉伸法		1、应力分布简单且明确 2、试样成型困难且不均匀 3、易在截面变化处应力集中
	三轴拉伸法		1、可模拟真实应力状态 2、装置与原理较为复杂 3、结果强烈依赖应力路径 4、不易出现纯拉伸破坏模式
间接拉伸法	径向压裂法		1、试样成型简单且均匀 2、破裂面应力分布不均 3、荷载点易出现应力集中 4、理论推导过程假设较多
	轴向压裂法		1、试样成型简单且均匀 2、破裂面应力分布不均 3、荷载点易出现应力集中 4、理论推导过程假设较多
	土梁弯折法		1、试验过程简单可控 2、试样较大温度均匀性差 3、破坏失效往往为断裂破坏 4、断裂强度近似代替抗拉强度
	液压劈裂法		1、试样制备节省土料 2、应力分布简单且明确 3、试样成型相对容易且均匀

变量法研究出发,进行单因素影响分析。

3.1 温度

冻土作为温敏材料,其物理力学性质极易受到温度波动影响。因此,一般将温度作为冻土性质的首要影响因素进行分析<sup>[49,62]</sup>。温度通过影响未冻水含量和含冰量对冻土物理力学性质产生影响,在体积含水量一定条件下,温度越低冻土内部的未冻水含量越少而含冰量越高,原本松散的土颗粒在冰晶

的联结作用下强度显著增加,冰晶强度越高胶结特性越强,则冻土整体强度越大<sup>[50,60,64]</sup>。即使高温冻土,其强度也可达到未冻土强度的几十倍不等,甚至可达百倍以上<sup>[31,59]</sup>。对于冻土抗拉强度与温度的关系,沈忠言等<sup>[28]</sup>认为在全负温段范围内,峰值拉应力与负温绝对值关系由幂函数表示;Zhou等<sup>[47]</sup>认为高温冻土段内,抗拉强度与温度可用幂函数描述。胡坤<sup>[64]</sup>则认为在高温冻土范围内,峰值应力与



温度关系可由二次函数和线性函数进行分段拟合且有较好的拟合优度。彭万巍<sup>[30]</sup>则发现在低变形速率时,冻土抗拉强度与温度有较好的线性相关性,而在高变形速率时,表现出先增后减的趋势且峰值转折点位于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 位置,此时不再适宜用线性函数拟合,并建议此转折温度作为“高温冻土”与“低温冻土”的温度界限,同时从未冻水含量变化特征曲线以及冰基质在高应力和变性能双重作用融化角度给出了解释。虽然该观点与目前主流认识有较大差异,但这对当时高温冻土研究以及后续高温冻土定义具有重要的指导和借鉴作用。此外,温度对试样的拉伸破坏模式也有显著影响。研究表明随着温度的降低,破坏模式由渐变破坏模式向突变破坏发展,极限应变减小,整体由黏塑性向黏弹性和脆性转变<sup>[32-33]</sup>。对于低温冻土,朱元林等<sup>[29]</sup>发现存在“脆性温度”,当温度低于脆性温度时,抗拉强度不增反降。并基于试验数据得出,冻结黄土脆性应变率与温度无关,而脆性温度又与应变率无关的结论,其内在机制仍有待进一步揭示。赵景峰<sup>[46]</sup>也得到一致的结论,但根据土性和含水量不同,该“临界温度”或“脆性温度”有所差异。Shen等<sup>[54]</sup>通过系统地研究,尝试着对不同温度区间冻土抗拉强度发挥机制进行分析,认为温度对抗拉强度的影响可分为三个方面:(1)高温冻结段:由于部分未冻水相变为冰,促进了冰的胶结作用。(2)低温冻结段:冰体积和冰强度的增加共同促进冰的胶结。(3)低温完全冻结段:完全由冰强度增加促进冰的胶结。

### 3.2 含水量

冻土含水量也称冻土总含水量,一般指冻土中所含冰和未冻水的总质量与土骨架质量之比。因此,对总含水量一定的冻土而言,含水量和含冰量是一对随温度变化动态平衡的物理量。

相关研究表明:在给定温度条件下,增加初始含水量导致拉伸强度显著增加且较小含量的变化可导致抗拉强度的显著变化,含水量对冻土抗拉强度效应明显<sup>[32]</sup>。在低温冻土范围内,含水量对土与结构面的抗拉强度影响成为超越温度的首要控制因素。同时,冻土抗拉强度与含水量存在较好的线性相关性,拟合优度均在0.96以上<sup>[34-35]</sup>。然而赵景峰<sup>[46]</sup>采用径向压裂试验研究了不同含水率下冻结粉质黏土的抗拉强度,结果表明:冻结温度在 $-1\sim-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且一定时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而逐渐降低;冻结温度在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,含水量大

于17%时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而降低缓慢,值得注意的是这与其他学者研究结论有所出入,需要进一步研究。张勇敢等<sup>[49]</sup>通过对膨胀土低温下的径向压裂试验发现:冻结膨胀土的抗拉强度随含水量的增加而增大,并且各温度条件下试样的抗拉强度与含水量之间均存在良好的线性关系。You等<sup>[53]</sup>通过对青藏高原粉质黏土的径向压裂试验发现:在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着初始含水量的增加,粉质黏土的抗拉强度先增加后降低,而当温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,含水量在10.9%范围内时,随着初始含水量的增加,抗拉强度随温度的降低单调增加但不显著。当初始含水量超过10.9%时,粉质黏土的抗拉强度随温度的降低而大幅增加。Shen等<sup>[54]</sup>分析发现冻土抗拉强度和破坏位移均随含冰量(8%至饱和)的增加呈指数增长。基于试验数据建立了一种新的冻土劈裂荷载-劈裂位移曲线分析模型,根据含冰量高低总结了冻土抗拉破坏模式,并将可视化分析方法引入冻土的径向劈裂研究中。

### 3.3 加载速率

加载速率(变形速率)主要通过影响冻土试样内部应变相较应力的迟滞效应来影响冻土的“加载强度”。因此,只有当加载速率较慢,应变迟滞效应可以忽略不计时的强度可以视作真实强度。

大量研究表明:加载速率对冻土抗拉强度和微裂纹的发育具有显著的影响<sup>[38,59]</sup>。通常,较小加载速率对冻土抗拉强度影响不大,但随着加载速率增大冻土抗拉强度有所增加且加载速率越快冻土抗拉强度峰值增长越大,冻土抗拉强度与加载速率对数有较好的线性相关特征并且随着温度的降低线性相关比例因子逐渐增大<sup>[30]</sup>。但此规律因冻土温度会有显著差异,路贵林<sup>[48]</sup>研究发现高温冻土段内冻土抗拉强度随加载速率增大而减小,而在较低温度条件下冻土抗拉强度随劈裂速率增加而增加。加载速率越大破坏时间会成倍缩短但破坏行程有所增加,破坏模式由塑性向脆性转变,朱元林等<sup>[29]</sup>研究发现:发生塑性向脆性转变的加载速率根据含冰量有较大的不同但与温度无关,当加载速率较大时会成为制约和确定试样拉伸破坏的主导因素。张勇敢等<sup>[49]</sup>通过对膨胀土低温下的径向压裂试验发现,当加载速率小于 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,载速率对抗拉强度几乎没有影响,当试验加载速率大于 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,试样的抗拉强度随着加载速率的增加而显著增大。而Shen等<sup>[54]</sup>分析发现同样规律,但该临界

加载速率为  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 当加载速率小于临界加载速率时对冻土破坏行为影响较小, 但如果加载速率较大则表现出准脆性破坏行为特征, 且具有明显的流变特性。

### 3.4 土质级配

由于土质和级配的差异会显著影响土体干密度, 因此本节将土质、级配以及干密度差异归为同类因素进行总结。有观点认为<sup>[35]</sup>, 相比温度和含水率对低温冻土抗拉强度影响, 土体干密度对冻土抗拉强度的影响程度可忽略不计。但有研究结果表明<sup>[38]</sup>, 饱和冻土在塑性破坏情况下, 抗拉强度随干密度减小而增大。并且对于干密度较小的冻土来说, 当加载速率较高时, 抗拉强度对于干密度的变化更敏感。张勇敢等<sup>[49]</sup>通过对冻结膨胀土的抗拉强度试验发现, 试样干密度大小会影响抗拉强度与温度的函数关系, 最大干密度时抗拉强度与温度之间可以采用线性关系来描述, 而小于最大干密度时抗拉强度与温度之间的关系更适合用指数函数关系来表达。土质对冻土抗拉强度的影响往往通过土的持水性差异体现, 通常细粒土的持水特性要明显超过粗粒土, 因此冻结细粒土的抗拉强度一般要超过粗粒土。但针对细粒土中典型的粉土、黏土以及粉质黏土等土质, 此时不能再简单以持水性进行大小进行抗拉强度判断, 由于黏土或粉质黏土中细颗粒含量较多, 导致其持水性一般要超过粉土, 然而细颗粒土表面能较大限制颗粒表面水的流动和相态变化。相同负温下往往粉土中的体积含冰量要多于其他两类土质, 而体积含冰量的多少又可以表征抗拉强度的大小。因此, 相同含水量下冻结粉土的抗拉强度要超过黏土和粉质黏土。Liu 等<sup>[62]</sup>通过对地铁联络通道内不同土质人工冻土的抗拉强度研究验证了该结论——不同土质的人工冻土抗拉强度随含水量的增加先增大后减小, 即存在一个最佳含水量此时抗拉强度最高。然而, 不同土质的冻土抗拉强度对应的最佳含水量是不同的。对于粉土含量约为 25%, 粉质黏土和黏土的含量更接近约为 35%。胡峰等<sup>[51]</sup>通过对低温冻土石混合体、冰石混合物和冻土的拉伸破坏特征分析发现, 混合土内不同成分的比例对冻土抗拉强度有显著影响且不同温度下这一影响机制会发生变化。此外, 纤维和橡胶等外加材料的掺入也会影响土体抗拉强度, 研究表明<sup>[65]</sup>, 加筋土的抗拉强度随着土的干密度和纤维含量的增加而显著增加, 但存在一个最佳

纤维掺量, 超过最佳含量后抗拉强度不增反降。此外, 由于纤维的掺入改变了原有素土的拉伸力学行为, 纤维加固使土壤从脆性变为更具韧性。与未掺纤维试样相比, 纤维的加入减少了峰值后拉伸强度的损失, 表现出不可忽略的残余强度。干密度越高的纤维加强土, 土颗粒与纤维相互作用越强。因此, 纤维的掺入也提高了干密度对于抗拉强度的影响<sup>[65]</sup>。而橡胶的掺入会降低冻结砂土强度, 即混合物中橡胶含量越高, 强度越低, 此时需要结合最小孔隙率公式确定最佳掺入比<sup>[33]</sup>。

### 3.5 试样尺寸

轴向压裂试样几何尺寸对于材料强度或疲劳强度的影响通常有以下两种解释: (1) 由比例因素引起的尺寸效应导致; (2) 由应力梯度引起的梯度效应。上述两种解释均是认为试样尺寸是通过影响冻土试样的应力分布来影响冻土强度的。现有研究表明: 尽管不同抗拉强度测试方法选用的试样形式各有不同, 但是均呈现出一个共同的影响规律: 试样越大, 峰值应力越小并且随着温度的降低和加载速率的增大这种影响越发明显。沈忠言通过轴向压裂试验获得了峰值拉应力与试样高度的拟合曲线, 并以 61.8 mm 高度试样峰值拉应力作为基准, 获得了强度比-高径比归一化曲线, 如图 7 所示。此后, 沈忠言<sup>[43]</sup>通过径向压裂试验获得了峰值拉应力与试样长度的拟合曲线, 并以 61.8 mm 长度试样峰值拉应力作为基准, 获得了强度比-长径比归一化曲线, 如图 8 所示。结果表明: 试样长径比在 0.4~2.1 范围内, 对径向压裂法的测定无实质性影响, 即此范围内长径比试样通过径向压裂法所得抗

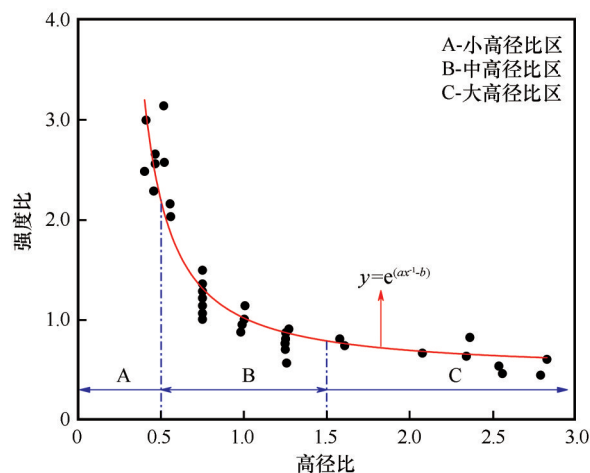
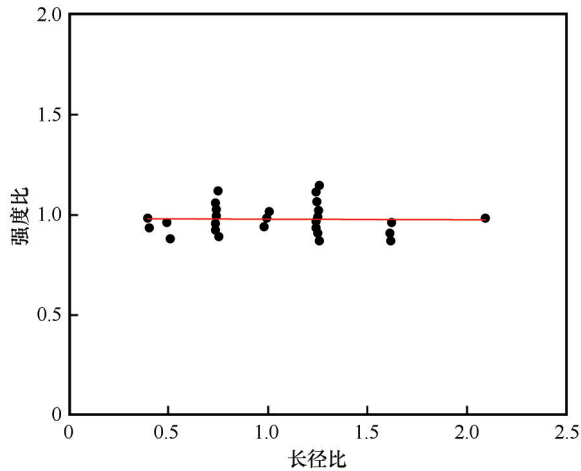


图 7 强度比-高径比归一化曲线<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Normalized of strength and slenderness ratio<sup>[28]</sup>



图8 强度比-长径比归一化曲线<sup>[43]</sup>Fig. 8 Normalized of strength and length-diameter ratio<sup>[43]</sup>

拉强度具有单值性,其他学者也得到了类似的结论。

#### 4 结论与展望

随着寒区岩土工程和人工冻结工程的发展,冻土力学问题也日益突出,其中的冻土抗拉强度问题越来越受到重视,系统而深入地开展冻土抗拉强度研究意义重大。本文介绍了国内外冻土抗拉强度的研究现状,从冻土抗拉强度测试方法、影响因素和存在的问题等角度出发,评价了试验方法,总结了试验规律,分析了制约因素。现对冻土抗拉强度研究进行如下总结和展望以供参考:

(1)冻土抗拉强度各类试验方法发展不平衡,在试验研究手段上多集中于单轴拉伸法和径向压裂法,三轴应力拉伸法、轴向压裂法和土梁弯折法涉及较少,而液压劈裂法作为新兴方法并未开展,如图9所示。因此,缺少各类典型试验的数据对比。此外,虽然各类试验方法测定冻土抗拉强度均具有较好规律,但是不同试验结果差异性较大数据可比性较差,缺少对差异结果的修正,限制了对冻土抗拉强度进一步分析。后续应深化冻土抗拉强度测试方法发展,进一步完善冻土抗拉强度研究体系。

(2)冻土抗拉强度研究多集中于低温冻土,高温冻土抗拉强度尤显不足。对低温冻土而言,未冻水含量和含冰量相对稳定,其力学性质相对稳定,测试结果相对可靠;但对高温冻土而言,微小的温度波动都会引起未冻水含量与含冰量的剧烈变化,导致高温冻土力学性质极不稳定。然而,目前对高温冻土抗拉强度研究工作较少,有限的的数据难以对高温冻土抗拉强度进行科学评估。后续应加大高

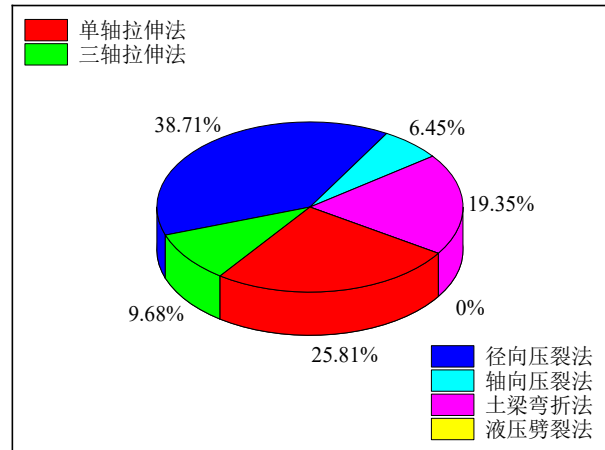


图9 冻土抗拉强度试验方法占比

Fig. 9 Proportion of test methods for tensile strength of frozen soil

温冻土抗拉强度测试研究,进一步完善高温冻土抗拉强度数据集。

(3)冻土抗拉强度多集中于宏观表象分析,微观研究尤显不足,抗拉强度的形成与发挥机制尚不清晰。此外,冻土抗拉强度受诸多因素影响且各影响因素之间相互耦合并不独立,然而,目前的研究分析多是从单因素角度出发的,并未进行耦合分析以及多因素响应下的冻土抗拉强度分析与预测。后续应开展冻土抗拉强度测试精细化和数字化研究,进一步揭示冻土抗拉强度形成与发挥机制。同时推进冻土抗拉强度多因素耦合分析,进一步提高冻土抗拉强度分析与预测。

(4)目前冻土抗拉强度的研究基本围绕室内理想状态试验进行,工程现场的原位测试数据匮乏,难以对室内试验数据准确评价。后续应结合工程实际拓展冻土抗拉强度试验研究范围,进一步加强室内室外双轨并行式研究思路。

#### 参考文献(References):

- [1] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen soil[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010. [徐教祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [2] Lu Xianlong, Chen Xiangsheng, Chen Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308-2314. [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.]
- [3] Ma Wei, Wang Dayan. Status quo and reflections of the deep frozen soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1123-1130. [马巍, 王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1123-1130.]

- [4] Rui D, Wu Z, Ji M, et al. Remediation of Cd-and Pb-contaminated clay soils through combined freeze-thaw and soil washing [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 87-95.
- [5] Qi Jilin, Dang Boxiang, Xu Guofang, et al. A state of the art for strength of frozen soils[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2016, 32(3): 89-95. [齐吉琳, 党博翔, 徐国方, 等. 冻土强度研究的现状分析[J]. *北京建筑大学学报*, 2016, 32(3): 89-95.]
- [6] Lai Y, Xu X, Dong Y, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 87: 6-18.
- [7] Wang Tianliang, He Yameng, Wu Zhen, et al. Effect of groundwater seepage on artificial freezing process in gravel layer[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(1):1-8. [王天亮, 何亚梦, 吴镇, 等. 地下水渗流对砾石地层人工冻结过程的影响[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(1): 1-8.]
- [8] Ji Enyue, Cheng Shengshui, Fu Zhongzhi. Experimental investigations on tensile cracking mechanical characteristics of gravelly core material [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4777-4782. [吉恩跃, 陈生水, 傅中志. 掺砾心墙料拉裂力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4777-4782.]
- [9] Cui P, Jia Y. Mountain hazards in the Tibetan Plateau: research status and prospects [J]. *National Science Review*, 2015, 2(4): 397-399.
- [10] Hao Junming, Wu Tonghua, Li Ren, et al. A case study on earthflow in Yushu, Qinghai Province on the northeastern Tibetan Plateau: landslide features and cause analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 447-456. [郝君明, 吴通华, 李韧, 等. 青藏高原东北部青海玉树泥石流滑坡特征和成因分析[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 447-456.]
- [11] Chai Mingtang, Ma Wei, Mu Yanhu. Distribution and engineering effect of supra-permafrost groundwater: review and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(6): 1794-1808. [柴明堂, 马巍, 穆彦虎. 冻结层上水的分布及工程影响研究现状与展望[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(6): 1794-1808.]
- [12] Huang Xubin, Sheng Yu, Huang Long, et al. Study of mechanical behaviors of pile foundation with enlarged end in seasonally frozen ground regions: progress and review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1220-1228. [黄旭斌, 盛煜, 黄龙, 等. 季节冻土区扩底单桩受力性能研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1220-1228.]
- [13] Zhou Yang, Zhou Guoqing, Wang Yijiang. Separate ice frost heave model for coupled moisture and heat transfer in saturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(11): 1746-1751. [周扬, 周国庆, 王义江. 饱和土水热耦合分离冰冻胀模模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(11): 1746-1751.]
- [14] Liu Yuhang, Li Dongqing, Ming Feng. Review on driving forces of soil fracture during ice lens formation process [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 657-668. [刘宇航, 李东庆, 明锋. 冰透镜体形成过程中的土体破裂驱动力研究综述[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(3): 657-668.]
- [15] Ple O, Lê T N H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 32: 111-116.
- [16] Cui Meng, Han Shangyu, Hong Baoning. Development and application of a new geotechnical device for direct tension test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1832-1840. [崔猛, 韩尚宇, 洪宝宁. 新型土工单轴拉伸试验装置的研制及应用[J]. *岩土力学*, 2017, 38(6): 1832-1840.]
- [17] Wang J J, Zhu J G, Chiu C F, et al. Experimental study on fracture toughness and tensile strength of a clay [J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1/2): 65-75.
- [18] Li J, Tang C, Wang D, et al. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(2): 133-137.
- [19] Rong Dezheng, Tang Chaosheng, Zeng Hao, et al. Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 670-678. [荣德政, 唐朝生, 曾浩, 等. 纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 670-678.]
- [20] Zhang Yun, Wang Huimin, Yan Lifan. Test research on tensile properties of compacted clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8): 2151-2157. [张云, 王惠敏, 鄢丽芬. 击实黏土单轴拉伸特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(8): 2151-2157.]
- [21] Lu Lina, Fan Henghui, Chen Hua, et al. Influencing factors for uniaxial tensile strength of dispersive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014(6): 1160-1166. [路立娜, 樊恒辉, 陈华, 等. 分散性土单轴抗拉强度影响因素试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014(6): 1160-1166.]
- [22] Cai Guoqing, Che Ruijie, Kong Xiao'ang, et al. Experimental investigation on tensile strength of unsaturated fine sands [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2017, 48(5): 623-630. [蔡国庆, 车睿杰, 孔小昂, 等. 非饱和砂土抗拉强度的试验研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 623-630.]
- [23] Zhang Zhitao, Chen Shengshui, Ji Enyue, et al. Study on tensile fracture properties of gravel soil reinforced by polypropylene fiber [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2713-2721. [张志韬, 陈生水, 吉恩跃, 等. 聚丙烯纤维加筋砾质黏土的拉伸断裂特性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2713-2721.]
- [24] Zhang Xutao, Zhang Qiangyong, Gao Qiang, et al. Development and application of geotechnical direct tension test devices [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1309-1315. [张绪涛, 张强勇, 高强, 等. 土工直接拉伸试验装置的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1309-1315.]
- [25] Huang Wei, Tao Yakun, Liu Qingbing, et al. Experimental study on tensile strength of remolded loess in Xinjiang Ili valley [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 92-97. [黄维, 陶亚坤, 刘清秉, 等. 新疆伊犁谷地重塑黄土抗拉强度试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5): 92-97.]
- [26] Chen Zhihao, Liu Jin, Qian Wei, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(2): 350-359. [陈志昊, 刘瑾, 钱卫, 等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(2): 350-359.]
- [27] Haynes F D. Strength and deformation of frozen silt [C]//Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, Canada: 1978.
- [28] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi. Tensile strength of frozen saturated loess [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(4): 315-321. [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.]

- [29] Zhu Yuanlin, Peng Wanwei, Wang Xianhao, et al. Effect of strain rate and temperature on tensile strength of frozen loess [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995 (Suppl 1): 71-75. [朱元林, 彭万巍, 王显耀, 等. 应变率及温度对冻结黄土抗拉强度的影响[J]. 冰川冻土, 1995 (增刊1): 71-75.]
- [30] Peng Wanwei. Tensile strength of frozen loess varying with strain rate and temperature [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(3): 31-33. [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.]
- [31] Akagawa S, Nishisato K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe [J]. *Cold regions science and technology*, 2009, 57(1): 13-22.
- [32] 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.
- [33] Christ M, Park J B. Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60(2): 169-175.
- [34] Sun T, Gao X, Liao Y, et al. Experimental study on adfreezing strength at the interface between silt and concrete [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 190: 103346.
- [35] Gao Xiaojing, Sun Tiecheng, Li Xiaokang, et al. Experimental study on tensile strength of silt-concrete interface under frost action [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 499-507. [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.]
- [36] Zhou Hongkui. The mechanism of fracture of soil samples in triaxial tensile test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 6(3): 11-23. [周鸿逵. 三轴拉伸试验中试样的断裂机理[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(3): 11-23.]
- [37] Zhu Chonghui, Liu Junmin, Yan Baowen, et al. Experimental study on relationship between tensile and shear strength of unsaturation clay earth material [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008 (Suppl 2): 3453-3458. [朱崇辉, 刘俊民, 严宝文, 等. 非饱和黏性土的抗拉强度与抗剪强度关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008 (增刊2): 3453-3458.]
- [38] Chen Youliang, Wang Ming, Xu Shan, et al. Tensile and compressive strength tests on artificial frozen soft clay in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(7): 1046-1051. [陈有亮, 王明, 徐珊, 等. 上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1046-1051.]
- [39] Chen Y, Azzam R, Wang M, et al. The uniaxial compressive and tensile tests of frozen saturated clay in Shanghai area [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(1): 29-36.
- [40] Song Bingtang, Liu Enlong, Zhang De, et al. Experimental study on the mechanical properties of warm frozen silt soils [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 595-605. [宋丙堂, 刘恩龙, 张德, 等. 高温冻结粉土力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 595-605.]
- [41] ISRM. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1978, 15(3): 99-103.
- [42] Bragg R A, Andersland O B. Strain rate, temperature, and sample size effects on compression and tensile properties of frozen sand [J]. *Engineering Geology*, 1981, 18(1/2/3/4): 35-46.
- [43] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi. The effect of length of specimen on the results in radial splitting test [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(4): 327-332. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智. 径压法冻土抗拉强度测定中试样长度的影响[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 327-332.]
- [44] Shen Zhongyan, Liu Yongzhi, Peng Wanwei, et al. Application of the radial-splitting method to determining tensile strength of frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 224-231. [沈忠言, 刘永智, 彭万巍, 等. 径向压裂法在冻土抗拉强度测定中的应用[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 224-231.]
- [45] Ma Qinyong. Tensile strength, uniaxial compressive strength test on artificially frozen soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(3): 76-81. [马芹永. 人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 76-81.]
- [46] Zhao Jingfeng. An experimental study on the relationship between tensile strength and temperature and water ratio of frozen soil [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(6): 1158-1161. [赵景峰. 冻土抗拉强度与冻温及含水率关系的试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(6): 1158-1161.]
- [47] Zhou G, Hu K, Zhao X, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils [J]. *Cold regions science and technology*, 2015, 113: 81-90.
- [48] Lu Guilin. Experimental study on mechanical properties for warm frozen soils in permafrost regions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015. [路贵林. 多年冻土区高温冻土力学特性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.]
- [49] Zhang Yonggan, Lu Yang, Liu Sihong, et al. Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(11): 2046-2054. [张勇敢, 鲁洋, 刘斯宏, 等. 基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2046-2054.]
- [50] Huang Xing, Li Dongqing, Ming Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1346-1352. [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.]
- [51] Hu Feng, Li Zhiqing, Sun Kai, et al. Comparison on the compressive and tensile failure properties of frozen soil-rock mixture, ice-rock mixture and frozen soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40 (Suppl 1): 2923-2934. [胡峰, 李志清, 孙凯, 等. 冻土石混合体、冰石混合物和冻土在压、拉作用下的破坏特征对比[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (增刊1): 2923-2934.]
- [52] Hu F, Li Z, Tian Y, et al. Failure patterns and morphological soil-rock interface characteristics of frozen soil-rock mixtures under compression and tension [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(1): 461.
- [53] You Z, Ma Y, Wang Z, et al. Tensile strength variation of a silty clay under different temperature and moisture conditions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189: 103314.
- [54] Shen M, Zhou Z, Ma W. Tensile behaviors of frozen subgrade soil [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022, 81(3): 1-27.
- [55] Wu Xuyang, Liang Qingguo, Niu Fujun, et al. Deformation failure mechanism in tensile test on remolded loess from Jiuzhou, Lanzhou [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 842-849. [吴旭阳, 梁庆国, 牛富俊, 等. 兰州九州重塑黄土的抗拉变形破坏机理[J]. 冰川冻土, 2017, 39



- (4): 842-849. ]
- [56] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi, et al. Preliminary research on axial splitting method for determining tensile strength of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(1): 33-39. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智, 等. 轴向压裂法测定冻土抗拉强度初步研究[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(1): 33-39. ]
- [57] Yin S, Wu S, Liu M, et al. Study on influencing factors of unconfined penetration test based on orthogonal design[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(2): 1-12.
- [58] Kolesnikov G, Gavrilov T. Method for estimating tensile stresses and elastic modulus of frozen soil with evolving crack[C]// *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2019: 296-305.
- [59] Azmatch T F, Sego D C, Arenson L U, et al. Tensile strength and stress-strain behaviour of Devon silt under frozen fringe conditions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68(1/2): 85-90.
- [60] Yamamoto Y, Springman S M. Three-and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0°C [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 134: 20-32.
- [61] Too J L, Cheng A, Khoo B C, et al. Hydraulic fracturing in a penny-shaped crack. Part I: methodology and testing of frozen sand[J]. *Journal of natural gas science and engineering*, 2018, 52: 609-618.
- [62] Tao L, Zhi H, Zhigang Z, et al. Artificial frozen soil bending test and bending property [C]// *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020, 165: 03028.
- [63] Yu Changyi, Liu Aimin, Guo Bingchuan, et al. Different tensile tests on difference of strength of frozen soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Suppl 2): 157-160. [于长一, 刘爱民, 郭炳川, 等. 冻土不同拉伸试验强度差异性研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊2): 157-160. ]
- [64] Hu Kun. Development of separated ice model coupled heat and moisture transfer in freezing soils[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011. [胡坤. 冻土水热耦合分离冰冻胀模型的发展[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011. ]
- [65] Li Y, Ling X, Su L, et al. Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 146: 53-59.

## Research status and prospect of tensile strength of frozen soil

WANG Haihang<sup>1</sup>, ZHOU Yang<sup>2</sup>, ZHAO Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Jianzhou<sup>1</sup>, ZHOU Guoqing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** A comprehensive grasp of the research status of tensile strength of frozen soil is the basis for further research. Firstly, the typical methods that can be used to test the tensile strength of frozen soil are introduced, and the test conditions, sample forms and stress mechanism of different test methods are described in detail. The advantages and disadvantages of typical tensile strength test methods are compared and listed. Secondly, the research work and shortcomings based on different test methods are summarized. Then, the latest research progress of the influence of temperature, water content, loading (deformation) rate, soil quality and sample size on the change law of frozen soil tensile strength is comprehensively analyzed. Finally, it is proposed to develop and improve the research method and system of frozen soil tensile strength, and increase the testing research of warm frozen soil tensile strength, so as to obtain the prospect of more accurately simulating the tensile failure behavior of frozen soil. It is pointed out that the internal cause of the formation of the tensile strength and the tensile failure mechanism of frozen soil should be thoroughly revealed by combining the research methods of microstructure and digital image technology of frozen soil. Based on the multi-factor test, a more perfect prediction method of frozen soil tensile strength is explored. Meanwhile, expand the in-situ test research on the tensile strength of frozen soil, and strengthen the parallel research ideas of indoor and outdoor double tracks. Through the analysis of the research status and development trend at home and abroad, it provides reference and guidance for the experimental study of frozen soil tensile strength, the improvement of theoretical model of frost heave, geotechnical engineering design in cold regions and artificial freezing reinforcement engineering.

**Key words:** frozen soil; tensile strength; direct tensile; indirect tensile; mechanical properties

(责任编辑：刘建坤)