

DOI: 10.11779/CJGE202111011

基于巴西劈裂试验的冻结膨胀土拉伸特性研究

张勇敢¹, 鲁洋^{*1, 2, 3}, 刘斯宏^{1, 3}, 李卓⁴, 张呈斌¹, 周雨奇¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室, 江苏 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 冻土的抗拉强度参数在涉及拉伸破坏的岩土工程问题中起着重要作用。为研究冻结膨胀土的拉伸特性, 采用巴西劈裂试验研究了加载方式、试样高径比、加载速率、温度、干密度和含水率对冻结膨胀土力-位移曲线、抗拉强度的影响。试验结果表明: 各试验温度、干密度和含水率工况下, 冻结膨胀土试样均呈现为典型的脆性破坏特征。冻结膨胀土试样的抗拉强度随温度的降低而增大。当试样干密度为最大干密度时, 其抗拉强度与温度之间可以采用线性关系来描述。然而, 对于干密度小于最大干密度的试样, 在试验温度范围内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。各含水率工况下, 抗拉强度与温度之间均可采用线性关系来表征, 且含水率越低, 单位温度降低所引起的抗拉强度增量越大。冻结膨胀土试样的抗拉强度随干密度和含水率的增加均增大, 并且各温度条件下抗拉强度与干密度和含水率之间均存在良好的线性关系。

关键词: 冻结膨胀土; 巴西劈裂试验; 抗拉强度; 温度; 干密度; 含水率

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)11-2046-09

作者简介: 张勇敢(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事寒区水工岩土方面的研究。E-mail: yonggan.zhang@hhu.edu.cn。

Experimental study on tensile strength of frozen expansive soils based on Brazilian splitting tests

ZHANG Yong-gan¹, LU Yang^{1, 2, 3}, LIU Si-hong^{1, 3}, LI Zhuo⁴, ZHANG Cheng-bin¹, ZHOU Yu-qi¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 3. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Nanjing 210098, China; 4. Department of Dam Safety Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The tensile strength of frozen soils plays an important role in geotechnical problems involving tensile failure. In order to study the tensile properties of frozen expansive soils, a series of Brazilian splitting tests (BST) are used to study the effects of loading mode, height to diameter ratio of samples, loading rate, temperature, dry density and water content on the force-displacement curve and tensile strength. The test results show that the frozen expansive soils exhibit typical brittle failure characteristics under different temperatures, dry densities and water contents. The tensile strength of the frozen expansive soils increases with the decrease of temperature. When the dry density of the sample is the maximum, the relationship between its tensile strength and temperature is linear. However, for the samples with dry density less than the maximum, the relationship between the tensile strength and the temperature within the test temperature range is more suitable to be expressed by an exponential function. The relationship between the tensile strength and the temperature of the frozen expansive soils can be described by a linear relationship with different water contents, and the lower the water content, the greater the increment of tensile strength caused by the decrease of unit temperature. The tensile strength of the frozen expansive soils increases with the increasing dry density and water content, and there is a good linear relationship between the tensile strength and the dry density and water content under various temperature conditions.

Key words: frozen expansive soil; Brazilian splitting test; tensile strength; temperature; dry density; water content

0 引言

中国是世界第三大冻土国, 其中多年冻土区约占国土总面积的 21.5%, 季节性冻土区约占国土总

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1765205, 52109123, 51979173); 中国博士后科学基金项目 (2021M690878); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX21_0511)

收稿日期: 2021-03-30

***通信作者** (E-mail: luy@hhu.edu.cn)

面积的 53.5%^[1]。同时中国又是一个膨胀土广泛分布的国家, 目前已在 20 多个省市发现膨胀土的分布^[2]。近年来, 随着国家基础建设的需要, 一大批寒区工程相继修建或拟建, 如黑龙江省北部引嫩工程、吉林省哈达山水利枢纽工程、新疆北部引额供水工程、吉图珥高铁、哈佳高铁和哈牡高铁等^[3], 这些典型的寒区长距离线性工程在建设过程中穿越了大量有“工程癌症”和“拦路虎”之称的膨胀土地段^[4]。基于工程设计和建设的迫切需要, 膨胀土的低温物理力学特性受到工程界和学术界的广泛关注。操子明等^[5]以冻结膨胀土为研究对象, 研究了含水率对冻结膨胀土单轴抗压强度的影响, 得出冻结膨胀土的单轴抗压强度随着含水率的增加先增大后减小, 当含水率为 20% 左右时试样的单轴抗压强度达到最大值。李兆宇等^[6]对冻结膨胀土开展了三轴压缩试验, 得出冻结膨胀土的屈服应力和塑性破坏应力随温度的降低而增大, 且抗剪强度与温度之间呈现出良好的线性函数关系。Lu 等^[7]探讨了冻融次数对膨胀土单轴压缩特性的影响, 得出试样的弹性模量和破坏强度在首次冻融循环后显著下降, 随后随着冻融循环次数的增加逐渐降低到一个稳定值。Tang 等^[8]通过固结不排水(CU)三轴试验研究了冻融循环作用对膨胀土强度的影响, 发现膨胀土的弹性模量、破坏强度和有效抗剪强度参数均随着冻融次数的增加而显著降低, 而当冻融次数超过某一阈值后, 冻融作用对膨胀土强度特性的影响则不再显著。可知, 上述研究成果主要聚焦于膨胀土在冻结状态或经受冻融作用后其单轴压缩特性和三轴压缩特性的演化规律, 而对于冻结条件下膨胀土拉伸特性方面的研究尚未涉及。

在岩土工程实践中, 土体的抗拉强度参数经常被忽视, 这主要是因为土体抗拉强度在数值上相对较小, 且难以准确测量^[9]。事实上, 土体的抗拉强度与抗压强度、抗剪强度等均是衡量土体物理力学性质的重要指标^[10-11]。如边坡后沿的张拉裂隙、输电线路铁塔和风电塔在水平荷载作用下引起周边土体发生的张拉破坏、防渗墙的水力劈裂等均与土体的抗拉强度有关^[9-10]。尽管冻土的抗拉强度同样显著低于其抗压强度, 但是冻土的抗拉强度在一定的温度、干密度和含水率工况下具有相当可观的数值, 因此在冻土路基、边坡和结构物等工程的设计和稳定性评价中均不应忽略冻土的抗拉强度指标^[12]。此外, 冻土的抗拉强度是冻土力学研究的主要内容之一, 在冻土理论发展的过程中具有重要地位^[13]。冻土的抗拉强度测定主要包括直接法和间接法两种方法, 直接法通常是通过对试样两端施加拉力来完成,

拉伸强度由施加的外力除以破坏面的横截面面积来确定, 但是直接法在实施时较为复杂和困难, 因为合适的试样形状、匹配的夹具、严格轴向受力的加载系统、高度稳定的制冷保温系统和高度稳定灵敏的测量系统等是直接拉伸法抗拉强度测试的必备条件^[14]; 间接法改变了试样的加载方式, 采用劈裂、弯折等方法结合理论公式进行抗拉强度的计算, 主要包括巴西圆盘劈裂试验、轴向压裂试验、弯曲试验等^[15], 其中巴西劈裂法不但在试样制备、试验设备和操作步骤方面都较为简单, 而且试验结果的稳定性也远高于直接拉伸试验, 因此在冻土抗拉强度测试中得到了广泛应用^[14,16-20]。

鉴于此, 本文以冻结膨胀土为研究对象, 开展冻结条件下膨胀土试样的巴西劈裂试验, 系统地探究加载方式、试样高径比、加载速率、温度、干密度和含水率对冻结膨胀土力-位移曲线特性的影响, 揭示抗拉强度的演变规律, 以期寒区环境中膨胀土路基、边坡和结构物等的设计提供有益参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验所用膨胀土取自南水北调中线工程叶县段输水渠道工程现场, 土料密封保存运回后, 依据《土工试验方法标准》^[21]进行膨胀土的基本物理性质试验。试验结果表明: 该膨胀土的最大干密度为 1.60 g/cm³, 最优含水率为 21.7%; 土料塑限含水率为 26.3%, 液限含水率为 70.8%, 塑性指数为 44.5, 依据土的工程分类标准可将其划分为高液限黏土(CH); 此外, 该膨胀土自由膨胀率为 59%, 属于弱膨胀土。其级配粒径组成见图 1。

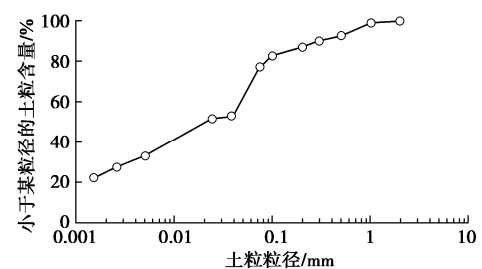


图 1 膨胀土级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of expansive soils

试验采用直径 61.8 mm 的标准圆柱体试样, 试样高度依据试验方案进行设置, 试样制备时采用图 2 所示的分层击实法。具体制备过程如下: ①将膨胀土土料风干、碾碎并过 2 mm 筛, 然后将风干土样均匀喷洒一定质量的水使其达到目标含水率, 随后装入密封塑料袋中闷料 24 h 使其水分均匀。②制样时依次称取一定量的膨胀土, 采用改进的分层击

实装置将土料精确击实至设计干密度^[22]（击实后每层土料厚度为 25 mm），第一层膨胀土土料击实完成后将其表面充分刨毛，然后加入第二层土料，如此反复，直至完成预定高度的试样制备。③试样制备完成后采用电动脱模机进行脱模并用保鲜膜包裹密封以防止水分损失。

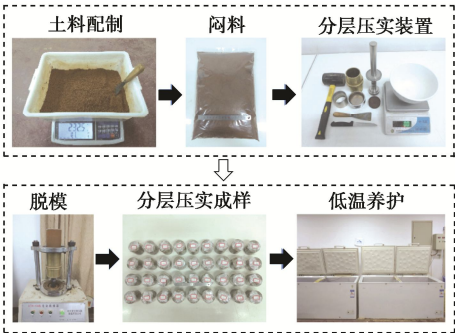


图 2 试样制备示意图

Fig. 2 Schematic graph of preparation process of sample

1.2 试验方法

为防止冻结过程中水分迁移、保证试样水分均匀，参考中科院冻土工程国家重点实验室推荐的试样冻结方法，即将制备完成的试样首先放入已经恒定的-30℃低温环境下迅速冻结，然后移入试验目标温度恒温养护足够时间^[23]，其中，试样迅速冻结和恒温养护的时间均为 12 h。随后，采用河海大学冻土实验室的单轴压缩试验机作为动力装置对养护完成的试样开展巴西劈裂试验（图 3）。

试验仪器主要由加载系统和控制系统两部分组成。竖向加载系统最大荷载为 100 kN，载荷传感器精度为±0.1%，位移传感器精度为±0.5%。试验机置于恒温房内，恒温房规格为 4 m×3.5 m×2.8 m、控温范围为-30℃~30℃、控温精度为±0.1℃、控温均匀度为±0.5℃。试验机具有自动数据采集与处理功能，可实时记录荷载与轴向位移。试验开始前，首先打开风冷式恒温房，设置恒温房温度与试验目标温度相同并恒温 2 h 以上，随后从恒温养护试验箱中取出冻结膨胀土试样安装于巴西劈裂试验装置上，在恒变形速率下进行加载直至试样劈裂。试样的抗拉强度采用 Shlido^[20]提出的公式计算：

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi Dh}$$

(1)

式中， σ_t 为抗拉强度， P_{\max} 为峰值荷载， D 为试样直径， h 为试样高度。

2 试验基本参数确定及试验方案

2.1 试验基本参数确定

(1) 加载方式



图 3 巴西劈裂试验装置

Fig. 3 Apparatus of Brazilian splitting test (BST)

以往针对冻土材料的巴西劈裂试验研究中，加载板与试样间的传力压块通常采用图 4 所示的 3 种形式：无压块^[16]，圆弧状压块^[14, 17]和尖状压块^[18]。遗憾的是上述研究中均未说明各组试验选取不同形式压块的依据。杨同等^[24]选用 6 种不同形式压块对砂岩、大理岩、花岗岩 3 种岩石共 91 件试样进行了劈裂试验，发现不同压块形式在测算岩石抗拉强度时的影响是不可忽略的。因此，本文首先采用上述 3 种不同形式的压块对相同试验工况下（表 1 中组别 1~3）的试样开展了巴西劈裂试验，并分析不同形式压块对试验结果的影响。

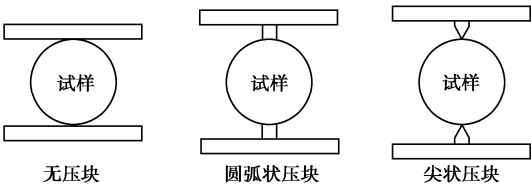


图 4 不同加载方式的巴西劈裂试验加载示意图

Fig. 4 Schematic graph of BST with different loading modes

表 1 试验基本参数确定方案

Table 1 Schemes for determination of basic parameters in tests

组别	加载方式	加载速率 /(mm·min ⁻¹)	试样高径比 (D=61.8 mm)
1	无压块	2	0.81(H=50 mm)
2	圆弧状		
3	尖状压块		
4	尖状压块	2	0.40(H=25 mm)
5			0.61(H=37.5 mm)
6			0.81(H=50 mm)
7			1.01(H=62.5 mm)
8			1.21(H=75 mm)
9			1.42(H=87.5 mm)
10	尖状压块	0.1	0.81(H=50 mm)
11		1	
12		2	
13		10	
14		20	

注：试验温度-10℃，试样含水率 21.7%，试样干密度 1.60 g/cm³，合计 36 个试样（各工况均设置 3 个平行试样）。

图 5 给出了不同加载方式下冻结膨胀土试样的劈裂压力和劈裂位移曲线，可以看出，不同加载方式下冻结膨胀土试样的力和位移曲线形态具有显著的差异性。对于采用无压块的试样，试样劈裂过程的径向压力随着径向位移的增加先快速增大，随后

几乎保持不变, 最后进一步增大。对于采用圆弧状压块的试样, 试样劈裂时的径向压力随着径向位移的增加先急剧增加后缓慢减小。对于采用尖状压块的试样, 试样在达到峰值径向压力后其力和位移曲线急剧降低直至径向压力减小为零, 试样的破坏呈现出典型的脆性破坏特征。进一步的, 图 6 给出了不同加载方式下冻结膨胀土试样的最终破坏形态, 可以看出, 对于采用无压块和圆弧状压块的冻结膨胀土试样, 其破坏形态呈现出典型的“X”型破坏形式, 并且采用无压块加载的试样其上、下表面均形成了可观的压缩平面, 这也是图 5 中采用无压块加载的试样其力和位移曲线后期上翘的原因。对于采用尖状压块的试样, 其破坏面为一贯穿于试样径向的平面, 该破坏形态更加符合巴西劈裂试验的基本假定。因此, 对于冻结膨胀土试样, 采用尖状压块开展巴西劈裂试验是最为合理的选择。

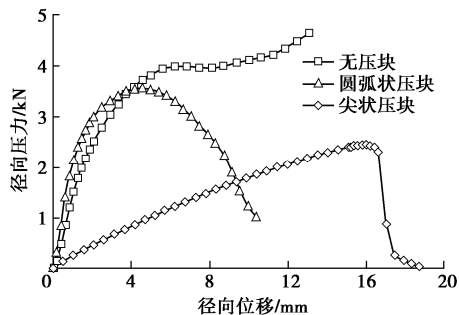


图 5 不同加载方式试样的力和位移关系曲线

Fig. 5 Relationship between load and displacement under different loading modes

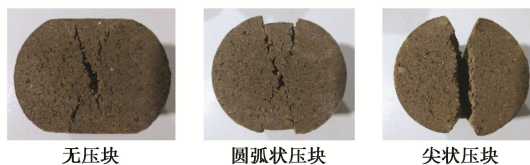


图 6 不同加载方式试样破坏后形态

Fig. 6 Failure modes of samples with different loading modes

(2) 试样高径比 (指试样冻结前的高径比)

沈忠言等^[19]采用不同长度的冻结黄土试样验证了高径比 ($H/D=0.4\sim 2.1$) 对试样的抗拉强度没有实质性影响; 相反, Deniz 等^[15]的研究表明压实黏土的抗拉强度与试样的高径比密切相关。Shlido^[20]对宽范围高径比冻土试样开展劈裂试验, 得出当试样高度小于直径时, 抗拉强度受高径比影响; 当试样的高径比在 $1\sim 2$ 时, 高径比则不再影响抗拉强度。因此, 设计了 6 组不同高径比的冻结膨胀土试验方案以探究高径比对其抗拉强度的影响 (表 1 中组别 4~9)。

图 7 给出了不同高径比冻结膨胀土试样的力和位移关系曲线, 可以看出, 不同高径比的试样均呈现出典型的脆性破坏特征, 但试样达到峰值径向压力时其对应的径向位移随着试样高度的增加而减小。将图 7 中不同高径比试样的峰值径向压力代入式 (1) 中可以得到图 8 所示的试样抗拉强度与高径比的关系曲线, 可以看出, 在试样高径比 $H/D=0.4\sim 1.42$ 范围内, 试样高度对冻结膨胀土试样的抗拉强度无实质性影响。此外, 考虑到试样制备过程中分层击实制样的便易性, 后续试验选用试样高径比为 0.81, 也即试样高度为 50 mm、直径 61.8 mm。

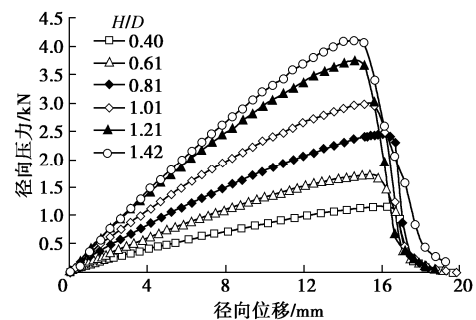


图 7 不同高径比试样的力和位移关系曲线

Fig. 7 Relationship between load and displacement under different heights/diameters (H/D)

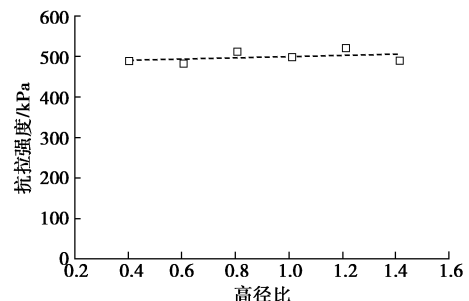


图 8 试样抗拉强度与高径比的关系

Fig. 8 Relationship between tensile strength and H/D

(3) 加载速率

加载速率是否对冻土试样的抗拉强度有影响目前同样没有统一的认识。Bragg 等^[17]和 Zhou 等^[18]的试验结果表明加载速率对冻土试样的抗拉强度无影响, 然而彭万巍^[13]、沈忠言等^[14]的试验结果却呈现出相反的结论。因此, 设计了表 1 中组别 10~14 所示试验方案以验证加载速率对冻结膨胀土试样抗拉强度的影响。

图 9 给出了不同加载速率下冻结膨胀土试样的力和位移关系曲线, 可以看出, 当试样的加载速率小于 2 mm/min 时, 试样在达到峰值径向压力前的力和位移曲线几乎完全重合, 这也预示着试样名义

表 2 冻结膨胀土巴西劈裂试验方案

Table 2 Schemes of Brazilian split tests on frozen expansive soils

组别	试验温度/°C	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%
1	-2	1.60	21.7, 19.7, 17.7, 23.7, 25.7
2		1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7
3		1.60	21.7, 19.7, 17.7, 23.7, 25.7
4	-5	1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7
5		1.60	21.7, 19.7, 17.7, 23.7, 25.7
6	-10	1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7
7		1.60	21.7, 19.7, 17.7, 23.7, 25.7
8	-15	1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7
9	-8	1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7
10	-13	1.60, 1.52, 1.44, 1.36, 1.28	21.7

上的弹性模量相同，与事实相符。当试样的加载速率进一步增大时，加载速率则影响了试样名义上的弹性模量。进一步的，图 10 给出了冻结膨胀土试样抗拉强度与加载速率的关系曲线，可以看出，当加载速率小于 2 mm/min 时，加载速率对试样的抗拉强度无显著影响，但当加载速率大于 2 mm/min 时，试样的抗拉强度随着加载速率的增加显著增大。因此，后续试验的加载速选取为 2 mm/min。

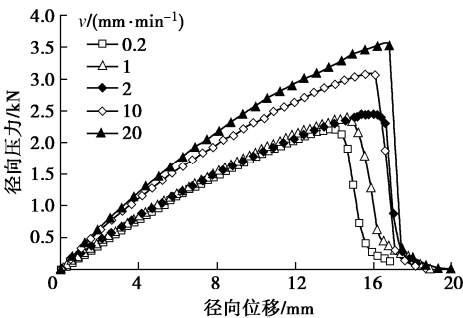


图 9 不同加载速率试样的力和位移关系曲线

Fig. 9 Relationship between load and displacement under different loading rates

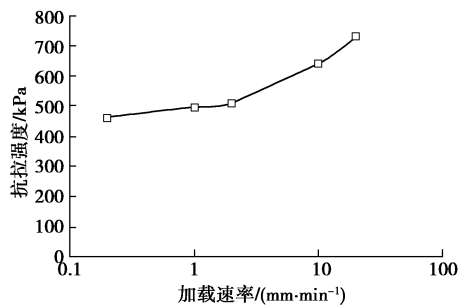


图 10 试样抗拉强度与加载速率的关系

Fig. 10 Relationship between tensile strength and loading rate

2.2 试验方案

为研究温度、干密度和含水率对冻结膨胀土力 - 位移曲线特性、抗拉强度的影响，在确定试验基本参数的基础上，制定了表 2 所示的试验方案：试样尺寸为 $D=61.8\text{ mm}$ ， $H=50\text{ mm}$ ；加载方式为尖状压块；加载速度为 2 mm/min；合计 138 个试样（各工况均设置 3 个平行试样）；组别 9，10 用于进一步验证图 14 中试验规律的准确性和合理性。

3 试验结果与分析

3.1 径向压力 - 径向位移关系

在其它试验条件一致的情况下，不同温度、干密度、含水率试样的力和位移曲线形态表现出较大的相似性，图 11 给出了不同试验工况下冻结膨胀土试样典型的径向压力 - 径向位移关系曲线。从图 11（a）中可以看出，随着温度的降低，试样破坏时的峰值径向压力不断增大，但峰值径向压力点对应的径向位移几乎保持不变。此外，冻结膨胀土试样的脆性特征随着温度的降低表现得更加显著。从图 11（b）中可知，随着干密度的增加，试样破坏时的径向压力和径向位移逐渐增大，并且试样的脆性随着干密度的增加表现的更加显著。试样在达到峰值径向压力前，其力和位移曲线的斜率随着干密度的增加而增大，这也预示试样的弹性模量不断增大。从图中 11（c）可以看出，试样破坏时的峰值径向压力和对应的径向位移均随着含水率的增加而增大，但峰值径向压力前各含水率试样的力和位移曲线斜率差别很小，这在一定程度上预示着含水率对冻结膨胀土试样的弹性模量影响不大。

3.2 破坏形式

图 12 给出了各试验工况下冻结膨胀土试样的最终破坏形式，从图中可以看出，虽然试验变量包括试验温度、试样干密度、试样含水率，但是各工况下试样的最终破坏形式却呈现出一致性，即各试样均在达到峰值径向压力后立即产生沿试样径向的贯穿性裂缝，这也能说明采用巴西劈裂试验可以有效的获取冻结膨胀土试样的抗拉强度参数。进一步的，图 13 给出了单个试样整个劈裂过程的示意图，从图中可以看出，试样劈裂过程的力和位移曲线以 C 点为分界点可以划分典型的 AC 和 CD 两部分。在 AC 段，巴西劈裂装置的尖状压块随着径向位移的增加不断贯入试样，此时试样表面完好，当径向压力达到试样的抗拉强度后（C 点），试样表面立即产生沿径向扩展的贯穿性裂缝，伴随着径向位移的进一步增加，试样的径向压力急剧降低直至为零（D 点），此时试样完全破坏。

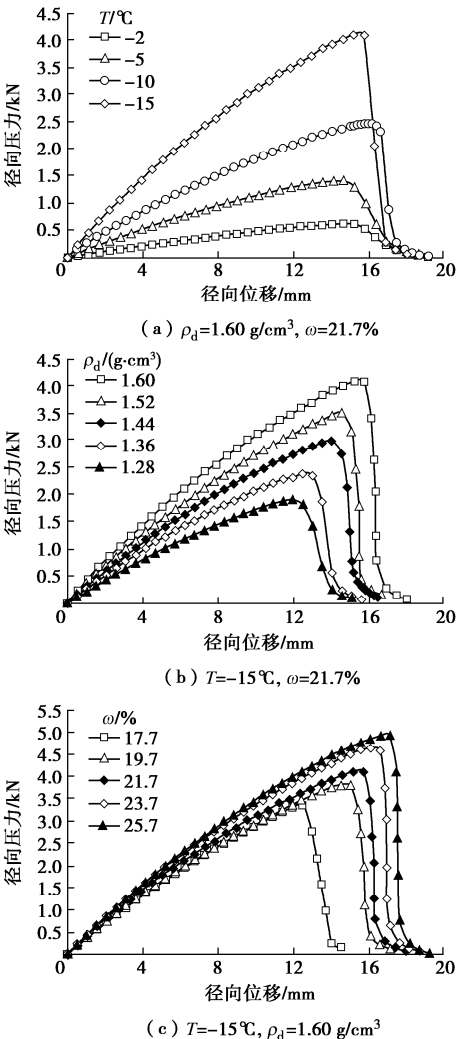


图 11 不同试验工况下试样的力和位移关系曲线

Fig. 11 Relationship between load and displacement under different test conditions

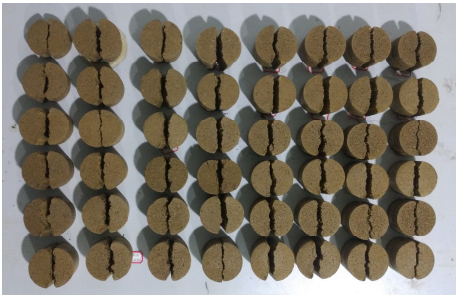


图 12 巴西劈裂试验试样最终破坏形式

Fig. 12 Failure mode of samples from Brazilian splitting tests

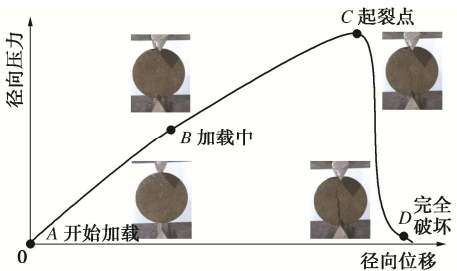


图 13 巴西盘劈裂试验加载过程示意图

Fig. 13 Loading process of Brazilian splitting tests

3.3 温度对抗拉强度的影响

温度是影响冻土力学特性的最关键因素。图 14 给出了不同干密度工况下冻结膨胀土试样的抗拉强度与温度的关系曲线，可以看出，冻结膨胀土试样的抗拉强度随着温度的降低而增大，这主要是因为随着温度的降低，试样中未冻水含量减小、含冰量增加，土颗粒之间的胶结力和试样内部冰的强度均增大^[25]。进一步的，表 3 给出了不同干密度工况下冻结膨胀土试样抗拉强度与温度的函数关系，从表中可以看出，对于干密度为最大干密度 1.60 g/cm³ 的试样，其抗拉强度与温度之间可以采用线性关系来描述。然而，对于干密度小于 1.60 g/cm³ 的试样，在试验温度范围内试样的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。这与 Zhu 等^[26]以及沈忠言等^[14]的研究成果有显著的不同。Zhu 等^[26]通过试验得出冻结粉土的抗拉强度与温度之间存在较好的幂函数关系，而沈忠言等^[14]通过试验得出冻结黄土的抗拉强度与温度之间存在良好的线性函数关系。这提示在考虑冻土抗拉强度与温度之间的关系时，土质和干密度的影响是不可忽略的。

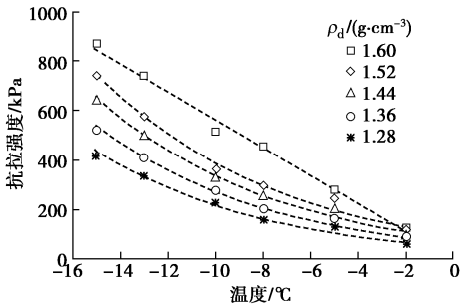


图 14 不同干密度工况下试样抗拉强度与温度的关系

Fig. 14 Relationship between tensile strength and temperature under different dry densities

图 15 给出了不同含水率工况下冻结膨胀土试样抗拉强度与温度的关系曲线（均为最大干密度 1.60 g/cm³），可以看出，各含水率工况下试样的抗拉强度均随温度的降低而线性增大，这也能在一定程度上佐证了表 3 中干密度较大（ $\rho_d=1.60\text{ g/cm}^3$ ）的冻结膨胀土试样其抗拉强度与温度之间的关系采用线性函数描述是合理的。表 4 给出了不同含水率工况下试样抗拉强度与温度的函数关系，可知含水率 17.7%，19.7%，21.7%，23.7%，25.7% 的冻结膨胀土试样随温度的降低其抗拉强度的增长速率依次为 47.822，52.877，56.084，58.904，60.073 kPa/°C。这表明冻结膨胀土试样的抗拉强度随温度降低而增加的速率随着含水率的增加而增大，产生上述现象的主要原因是含水率越高，试样内部的含冰量越大，而冻土试样的抗拉强度随着含冰量的增加而增大^[27]。

表 3 不同干密度工况下试样抗拉强度与温度的函数关系
Table 3 Functions of tensile strength and temperature under different dry densities

干密度/(g·cm ⁻³)	关系式	R ²
1.60	$\sigma_t = -56.439T - 0.6716$	0.9912
1.52	$\sigma_t = 103e^{-0.133T}$	0.9686
1.44	$\sigma_t = 88.023e^{-0.134T}$	0.9760
1.36	$\sigma_t = 69.5856e^{-0.137T}$	0.9768
1.28	$\sigma_t = 53.763e^{-0.14T}$	0.9769

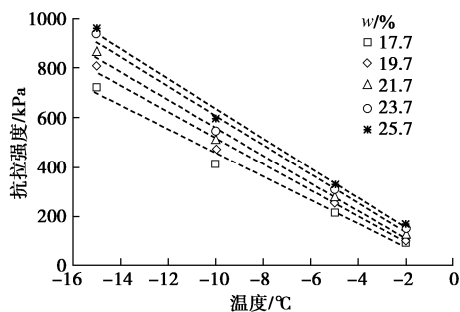


图 15 不同含水率工况下试样抗拉强度与温度的关系
Fig. 15 Relationship between tensile strength and temperature under different water contents

表 4 不同含水率工况下试样抗拉强度与温度的函数关系
Table 4 Function of tensile strength and temperature under different water contents

含水率/%	关系式	R ²
17.7	$\sigma_t = -47.822T - 20.219$	0.9865
19.7	$\sigma_t = -52.877T - 10.506$	0.9888
21.7	$\sigma_t = -56.084T - 0.6099$	0.9895
23.7	$\sigma_t = -58.904T + 18.001$	0.9847
25.7	$\sigma_t = -60.073T + 33.829$	0.9941

3.4 干密度对抗拉强度的影响

干密度是影响冻土强度的另一关键因素。图 16 给出了不同温度工况下试样抗拉强度与干密度的关系曲线，可以看出，各温度条件下冻结膨胀土试样的抗拉强度均随着干密度的增加而增大，这与 Zhu 等^[26]关于饱和冻土拉伸特性研究得出的结论相反。产生这种现象的原因可以解释如下：对于相同工况的试样，干密度越小其孔隙率越大，试样饱和后体积含水率越高，相应的，试样冻结后其体积含冰量越大，因此饱和冻土的极限抗拉强度随干密度的减小而增大。而本研究中的试样均为初始含水率相同的非饱和试样，试样的干密度越大其体积含水率越高，试样冻结后其体积含冰量也就越大，因此冻结膨胀土试样的抗拉强度随着干密度的增加而增大^[27]。此外，表 5 给出了不同温度条件下冻结膨胀土试样抗拉强度与干密度的函数关系，从表中可知，各温度条件下试样的抗拉强度与

干密度之间呈现出良好的线性函数关系，并且抗拉强度随干密度增加而增大的速率随着温度的降低而显著增大。

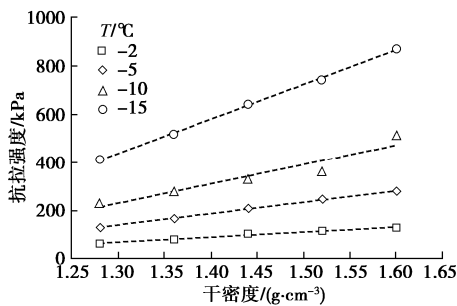


图 16 不同温度工况下试样抗拉强度与干密度的关系
Fig. 16 Relationship between tensile strength and dry density under different temperatures

表 5 不同温度下试样抗拉强度与干密度的函数关系
Table 5 Functions of tensile strength and dry density under different temperatures

温度/°C	关系式	R ²
-2	$\sigma_t = 213.62\rho_d - 209.96$	0.9934
-5	$\sigma_t = 479.23\rho_d - 484.79$	0.9988
-10	$\sigma_t = 822.95\rho_d - 841.69$	0.9184
-15	$\sigma_t = 1413.6\rho_d - 1398.2$	0.9988

3.5 含水率对抗拉强度的影响

含水率同样也是影响冻土强度的关键因素。图 17 给出了各温度条件下试样抗拉强度随含水率的变化关系，从图中可知，冻结膨胀土试样的抗拉强度随着含水率的增加而增大，并且各温度工况下试样的抗拉强度与含水率均呈现出典型的线性函数关系（表 6）。事实上，以往研究中关于含水率对冻土试样抗拉强度的影响效应并未得出一致性结论。Christ 等^[28]对初始含水率为 15%~30%（其饱和度为 50.47%~90.70%）的冻结粉土开展单轴拉伸试验，得出试样的抗拉强度随着含水率的增加而增大，这与本研究中非饱和冻结膨胀土试样的试验结论相一致。然而，赵景峰^[29]对初始含水率为 14%~25%的冻结粉质黏土开展巴西劈裂试验，得出试样在-1℃~-24℃温度范围内其抗拉强度随着含水率的增加而减小。Liu 等^[30]采用 4 点弯曲试验系统研究了冻结粉土、冻结粉质黏土、冻结黏土的抗拉强度特性，试样初始含水率分别选取为 15%，20%，25%，30%，35%，40%，试验结果表明 3 种不同土质的冻土试样其抗拉强度均表现为随着含水率的增加先增大后减小，但是不同土质试样的抗拉强度最大值对应的含水率并不完全相同（粉土为 25%，粉质黏土和黏土为 35%）。产生上述这种差异现象的微观力学机制尚待开展进一步研究。

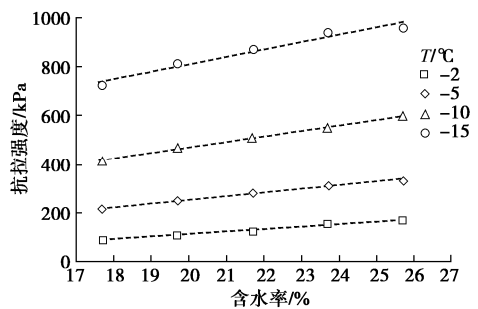


图 17 不同温度工况下试样抗拉强度与含水率的关系

Fig. 17 Relationship between tensile strength and water content under different temperatures

表 6 不同温度下试样抗拉强度与含水率的函数关系

Table 6 Function of tensile strength and water content under different temperatures

温度/℃	关系式	R^2
-2	$\sigma_t = 9.8871w - 81.863$	0.9888
-5	$\sigma_t = 14.4031w - 33.324$	0.9882
-10	$\sigma_t = 22.204w + 27.55$	0.9917
-15	$\sigma_t = 29.674w + 216.07$	0.9666

4 结 论

本文以冻结膨胀土为研究对象,开展了冻结条件下膨胀土试样的巴西劈裂试验,系统研究了加载方式、试样高径比、加载速率、温度、干密度和含水率对冻结膨胀土力-位移曲线特性、抗拉强度的影响,得出 5 点结论。

(1)对于冻结膨胀土试样,采用尖状压块开展巴西劈裂试验是最为合理的选择。试样的高径比对冻结膨胀土试样的抗拉强度无实质性影响。当试验加载速率小于 2 mm/min 时,加载速率对抗拉强度几乎没有影响,当试验加载速率大于 2 mm/min 时,试样的抗拉强度随着加载速率的增加而显著增大。

(2)各试验温度、干密度和含水率工况下,冻结膨胀土试样均呈现为典型的脆性破坏特征,因此巴西劈裂试验可以合理的反映冻结膨胀土试样拉伸强度特性。

(3)冻结膨胀土试样的抗拉强度随温度的降低而增大。当试样干密度为最大干密度 1.60 g/cm³ 时,其抗拉强度与温度之间可以采用线性关系来描述。然而,对于干密度小于 1.60 g/cm³ 的试样,在试验温度范围内试样的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。

(4)各含水率工况下,冻结膨胀土试样的抗拉强度与温度之间均可采用线性关系来描述,并且含水率越低,单位温度降低所引起的抗拉强度增量越大。

(5)冻结膨胀土试样的抗拉强度随干密度和含水

率的增加均增大,并且各温度条件下试样的抗拉强度与干密度和含水率之间均存在良好的线性函数关系。

参考文献:

[1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xing. Permafrost Physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))

[2] 钮新强,蔡耀军,谢向荣. 膨胀土渠道处理技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (NIU Xin-qiang, CAI Yao-jun, XIE Xiang-rong. Treatment technology of expansive soil channel[M]. Wuhan: Changjiang Publishing House, 2016. (in Chinese))

[3] 蔡正银,朱 洵,黄英豪,等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1381 - 1389. (in Chinese))

[4] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi-wen. Expansive Soil and Railway Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))

[5] 操子明,马芹永. 含水率对冻结膨胀土单轴抗压强度影响的试验与分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(4): 19 - 23. (CAO Zi-ming MA Qin-yong. Experiment and analysis of influence of water content on uniaxial compressive strength of frozen expansive soil[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 38(4): 19 - 23. (in Chinese))

[6] 李兆宇,张 滨. 冻结膨胀土应力-应变关系试验研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 902 - 906. (LI Zhao-yu, ZHANG Bin. Experimental study of stress-stain relationships of frozen expansive soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 902 - 906. (in Chinese))

[7] LU Y, LIU S H, ALONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 206 - 214.

[8] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197 - 207.

[9] LI H D, TANG C S, CHENG Q, et al. Tensile strength of

- clayey soil and the strain analysis based on image processing techniques[J]. *Engineering Geology*, 2019, **253**: 137 – 148.
- [10] TANG C S, PEI X J, WANG D Y, et al. Tensile strength of compacted clayey soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, **141**(4): 4014122.
- [11] 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. (YU Chang-yi, LIU Ai-min, GUO Bing-chuan, et al. Different tensile tests on difference of strength of frozen soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(S2): 157 – 160. (in Chinese))
- [12] 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. (SHEN Zhong-yan, PENG Wan-wei, LIU Yong-zhi. Tensile strength of frozen saturated loess[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, **17**(4): 315 – 321. (in Chinese))
- [13] 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. (PENG Wan-wei. Tensile strength of frozen loess varying with strain rate and temperature[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, **20**(3): 31 – 33. (in Chinese))
- [14] 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. (SHEN Zhong-yan, LIU Yong-zhi, PENG Wan-wei, et al. Application of radial-splitting method to determining tensile strength of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, **16**(3): 224 – 231. (in Chinese))
- [15] DENIZ AKIN I, LIKOS W J. Brazilian tensile strength testing of compacted clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, **40**(4): 20160180.
- [16] LEE M, FOSSUM A, COSTIN L, et al. Frozen soil material testing and constitutive modeling[R]. Albuquerque: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2002.
- [17] 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.
- [18] ZHOU G Q, HU K, ZHAO X D, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, **113**: 81 – 90.
- [19] 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. (SHEN Zhong-yan, PENG Wan-wei, LIU Yong-zhi. The effect of length of specimen on the results in radial splitting test[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, **16**(4): 327 – 332. (in Chinese))
- [20] SHLOIDO G A. Determining the tensile strength of frozen ground[J]. *Hydrotechnical Construction*, 1968, **2**(3): 238 – 240.
- [21] 土工试验方法标准: GB/T50123—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: GB/T50123 — 2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [22] LU Y, LIU S H, ZHANG Y G, et al. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, **170**: 102926.
- [23] LAI Y M, LIAO M K, HU K. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, **78**: 84 – 113.
- [24] 杨同, 王宝学, 孙林, 等. 垫条方式对岩石劈裂试验的影响分析[J]. *勘察科学技术*, 2002(1): 3 – 7. (YANG Tong, WANG Bao-xue, SUN Lin, et al. Effects of various spacer methods for rock split tests[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2002(1): 3 – 7. (in Chinese))
- [25] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (MA Wei, WANG Da-yan. *Mechanics of Frozen Soil*[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [26] ZHU, Y, CARBEE D L. Tensile strength of frozen silt[R]. Fairbanks: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1987, **87**(15): 56 – 78.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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. (ZHAO Jing-feng. 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. (in Chinese))
- [30] LIU T, HUANG Z, ZHENG Z G, et al. Artificial frozen soil bending test and bending property[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, **165**: 3028.