

DOI: 10.11779/CJGE201712024

# 不同加载速率下冻结黏土的强度及破坏特性

栗晓林<sup>1,2</sup>, 王红坚<sup>3</sup>, 牛永红<sup>\*1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035)

**摘要:** 冻土在不同加载速率下的强度和变形特性, 是改进冻土机械开挖方法和设备所需的重要参数。通过对冻结黏土进行单轴压缩试验, 研究了不同温度和加载速率条件下冻结黏土的强度特性、模量特性和破坏特性。通过分析试验, 得到以下结论: ①冻结黏土的抗压强度和起始屈服应力均随温度的降低和加载速率的增大而增大, 且起始屈服应力与抗压强度有很好的线性关系。②温度和加载速率对起始屈服模量和切线模量影响很大, 不同温度条件下切线模量与加载速率存在对数函数关系。③在不同温度条件下, 破坏应变和破坏时间均随加载速率的增大而减小。④在较大加载速率条件下, 温度对冻结黏土的破坏应变和破坏时间影响不明显。

**关键词:** 冻结黏土; 加载速率; 强度特性; 模量特性; 破坏特性

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2335-06

**作者简介:** 栗晓林(1990-), 男, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事寒区工程和冻土力学方面的研究。E-mail: lxlin1102@126.com。

## Strength and failure properties of frozen clay under varying loading rates

LI Xiao-lin<sup>1,2</sup>, WANG Hong-jian<sup>3</sup>, NIU Yong-hong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The First Engineers Scientific Research Institute, Wuxi 214035, China)

**Abstract:** The strength properties of frozen soils under varying loading rates are the important parameters for improving the mechanical excavation methods and equipments. The strength, modulus and failure properties of frozen clay are studied through a series of uniaxial compressive tests conducted on remolded frozen clay samples. From the test results, it is concluded that (1) The compressive strength and the initial yield stress increase with the decreasing temperature and the increasing loading rate, and there exists a good linear relationship between the failure strength and the initial yield stress. (2) The initial yield modulus and the tangent modulus are sensitive to the temperature and loading rates, and there is a logarithmic function relationship between the tangent modulus and the loading rates under different temperatures. (3) The failure strain and damage time decrease with the increase of loading rates under different temperatures. (4) The effects of temperature on the failure strain and damage time are not evident at large loading rates.

**Key words:** frozen clay; loading rate; strength; modulus; failure property

## 0 引言

冻土是由固体矿物颗粒、冰包裹体、液相水和气态包裹体组成的非均质、各相异性的复杂体系<sup>[1]</sup>。在冻土形成过程中, 液态水转变为固态冰, 由于冰的胶结作用提高了土的黏聚力, 使冻土的力学性质较融土复杂得多, 冻土强度约为相应条件下融土强度的 10~20 倍<sup>[2]</sup>。一直以来, 冻土的强度和破坏特性是冻土力学的重要研究内容。在寒区工程如道路路基、桥梁桩基、油气管道铺设、矿产开发以及工业民用建筑的施工中, 均涉及到冻土开挖问题, 可见, 提高冻土开挖

效率和经济性, 具有重要的现实意义。

为解决冻土开挖问题, 首先需要对冻土力学性质进行深入研究。抗压强度是衡量冻土是否破坏的重要指标, 而且国内外做了很多关于冻土抗压强度的研究。早在 19 世纪 30 年代, 俄罗斯冻土学家崔托维奇在不同温度和加载速率条件下对冻结砂土进行了单轴压缩

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071045); 冻土工程国家重点实验室自主立项课题 (SKLFSE-ZY-15)

收稿日期: 2016-09-18

\*通讯作者 (E-mail: yhnui@lzb.ac.cn)

试验, 得出冻结砂土抗压强度随温度的降低和加载速率的增加而增加的规律<sup>[1]</sup>。之后国外许多著名学者也进行了这方面的研究, 如 Haynes 等<sup>[3]</sup>、Bragg 等<sup>[4]</sup>。在国内, Zhu 等<sup>[5]</sup>、李海鹏等<sup>[6-7]</sup>、杜海民等<sup>[8]</sup>通过进行大量的单轴抗压强度试验, 研究了应变率、温度、干密度、含水率对冻土抗压强度、线性模量、破坏应变、起始屈服强度、起始屈服应变的影响规律, 并指出应变率是最主要的影响因素。此外, 许多学者还利用 SHPB 分别对冻土的瞬态变形、强度以及冲击破坏特性进行了研究。

虽然对冻土抗压强度的研究比较详尽, 但在高应变率下冻土抗压强度和破坏特性的研究尚不完善。鉴于此, 本文对冻结黏土进行了不同温度和加载速率条件下的单轴压缩试验, 并讨论了冻结黏土的强度特性、模量特性及破坏特性。

1 试验介绍

1.1 试验仪器

本次试验采用 MTS 低温单轴材料试验机, 该仪器的主要技术指标如下: 最大轴向负荷为 50 kN; 最大轴向位移为±85 mm; 频率范围为 0~50 Hz; 温度范围为常温~-30℃。

1.2 样品制备

试验所选用的土样为吉林延吉黏土, 试验土样黏聚体粒径分布情况见表 1。参照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999) 中关于试样制备的要求, 按如下步骤进行制备: ①将取回的土样风干、碾压、过筛, 并测定不同黏聚体粒径下土样的含水率; ②分别取不同黏聚体粒径下的土样配置成含水率为 30% 的黏土, 限制蒸发保湿 24 h, 使得土样中各点处水分均匀; ③将制备好的土样用压样机压成直径 61.8 mm、高度 125 mm 的试样, 并放入-30℃的冷冻箱里快速冻结 48 h; ④脱模, 并将试样套上橡胶套, 放入恒温箱, 按照设定温度恒温 24 h, 保持土样温度整体一致, 然后进行试验。

表 1 试样黏聚体粒径分布

Table 1 Particle composition of samples

粒径范围/mm	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
占百分比/%	24.07	31.05	17.42	23.84	3.63

1.3 试验方法

试验采用应变控制法, 参照《土工试验方法标准》无侧限抗压强度试验中轴向应变速率为每分钟 1%~3% (即加载速率为 1.25~3.75 mm/min), 试验最小加载速率设为 4 mm/min (即 0.067 mm/s); 在实际工程中, 支承式碎土挖掘机的施工装置可以以应变率为 10<sup>-1</sup>~10/s 的速度作用于冻土<sup>[9]</sup>, 但考虑到试验设备的

性能, 试验最大加载速率设为 500 mm/s (即应变率为 4/s)。本次试验条件如下: 加载速率分别为 0.067, 0.333, 1, 2, 4, 20, 50, 100, 500 mm/s, 试验温度为-3℃、-10℃、-20℃。由于试验设备最大轴向负荷为 50 kN, 未能进行-20℃条件下 100, 500 mm/s 试验。具体试验过程如下: 先将试样放入试验所要求温度条件下恒温 24 h, 然后在带有恒温箱的单轴压缩试验机上进行恒变形速率下的单轴无侧限抗压强度试验, 所有试验均在冻土工程国家重点实验室冻土单轴压缩试验机上完成。

2 试验结果

在不同温度条件下, 加载速率对冻结黏土应力-应变关系曲线影响趋势相似, 故选用-10℃冻结黏土在不同加载速率条件下的一组应力-应变关系曲线来表示 (如图 1), 取峰值应力或应变为 20% 时的应力作为单轴抗压强度  $\sigma_m$ , 其相应的应变、时间分别为破坏应变  $\varepsilon_f$  和破坏时间  $t_f$ 。从图形中可以发现各曲线在点 Y 处斜率发生明显变化 (如图 1 中△所示), 将此处的应力、应变取为起始屈服应力  $\sigma_y$  及起始屈服应变  $\varepsilon_y$ , 二者之比定义为起始屈服模量  $E_0$ 。由图可见, 冻结黏土受压之后, 会经过一个应力-应变大致呈线性关系的阶段而后渐渐屈服, 本文将此线性段的斜率定义为冻结黏土的切线模量  $E_i$ 。

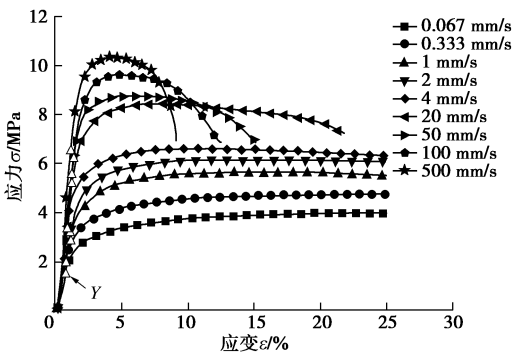


图 1 不同加载速率条件下冻土的应力应变关系曲线

Fig. 1 Relationship between stress and strain under different loading rates

3 讨论

通过一系列的试验结果发现: 在较小加载速率条件下冻结黏土的应力-应变曲线呈现为应变硬化, 而在较大加载速率条件下其应力-应变曲线呈现为应变软化。以下分别来分析冻结黏土的强度特性、模量特性和破坏特性。

3.1 强度特性分析

(1) 抗压强度与温度、加载速率的关系

图2为不同加载速率条件下冻结黏土抗压强度随温度变化的双对数坐标图。由图中曲线可以看出, 冻结黏土的抗压强度随温度的降低和加载速率的增加而增加, 但随着温度的降低, 加载速率对抗压强度的影响逐渐增大。

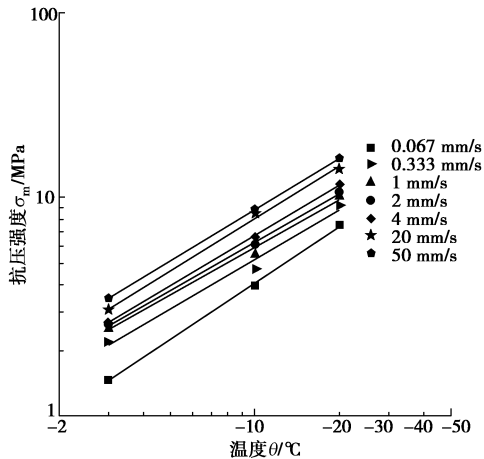


图 2 不同加载速率条件下单轴抗压强度和温度关系

Fig. 2 Relationship between uniaxial compressive strength and temperature under different loading rates

通过对试验数据拟合分析, 冻结黏土的抗压强度与温度的关系可表示为

$$\sigma_m = a \cdot |\theta|^b, \tag{1}$$

式中,  $a$ ,  $b$ 是和加载速率有关的参数, 拟合结果列于表2。

表 2 拟合结果汇总表

Table 2 Results of fitting

加载速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	$a$	$b$	$R^2$
0.067	0.569	0.854	0.997
0.333	0.924	0.750	0.973
1	1.122	0.722	0.989
2	1.149	0.738	0.997
4	1.153	0.768	0.999
20	1.297	0.796	0.996
50	1.478	0.777	0.999

由表2可见,  $b$ 值变化不大, 可作常数处理, 故取其平均值为0.771,  $a$ 值随着加载速率的增大而增大, 由图3可见, 二者关系变化可用下式表示:

$$a = c + d \cdot \lg v, \tag{2}$$

式中,  $c$ ,  $d$ 值分别为1.01, 0.28, 相关系数 $r^2$ 为0.9111,

综合式(1)、(2)可得

$$\sigma_m = (1.01 + 0.28 \cdot \lg v) \cdot |\theta|^{0.771}. \tag{3}$$

表 3 为抗压强度实测值与预测值比较。为分析预测准确程度, 采用(预测值-实测值)/实测值来判断式(3)的适用性, 通过分析式(3)的预测准确度偏差在 5%左右, 且随着加载速率增大, 偏差减小, 预测准确度提高, 故此公式适用于大加载速率条件下冻结黏土抗压强度的预测。

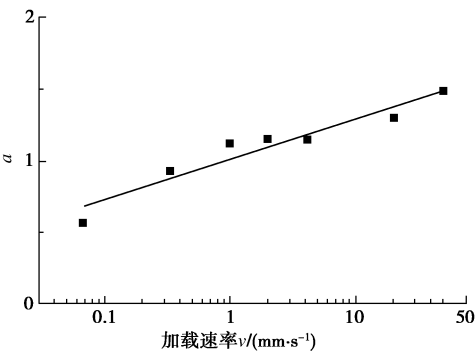


图 3  $a$  值和加载速率关系

Fig. 3 Relationship between  $a$  and loading rates

此外, 由图 3 可以看出: 不同数量级加载速率条件下  $a$  值差距比较明显, 同一数量级加载速率条件下其变化较小, 且加载速率 $<1$  mm/s 时,  $a$  值小于 1, 与之对应的应力-应变曲线表现为硬化特性, 试样破坏形式为塑性破坏; 随着加载速率的逐渐增大,  $a$  值也逐渐增加, 与之对应的应力-应变曲线由硬化特性转变为软化特性, 试样破坏形式也由塑性破坏转变为脆性破坏。

(2) 起始屈服应力与温度、加载速率的关系

图 4 为不同温度和加载速率条件下冻结黏土起始屈服应力与抗压强度之间的关系。由该图可见, 在不同温度和加载速率条件下, 起始屈服应力与抗压强度变化趋势相同, 均呈线性增加, 且线性关系表示为

$$\sigma_y = k \sigma_m + C. \tag{4}$$

表 4 为拟合结果。由表可得: 式(4)中  $k$  值变化很小, 但  $C$  值变化较大, 说明冻结黏土起始屈服应力与抗压强度变化趋势基本不受加载速率的影响, 只是在不同温度条件下冻结黏土抗压强度的增大导致起始屈服应力增大, 从而  $C$  值不同。此外, 由于起始屈服

表 3 抗压强度实测值与预测值比较

Table 3 Comparison between measured and predicted values of compressive strength

加载速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	实测值			预测值		
	-3℃	-10℃	-20℃	-3℃	-10℃	-20℃
0.067	1.471	3.949	7.502	1.589	0.067	1.589
0.333	2.183	4.727	9.298	2.044	0.333	2.044
1	2.532	5.591	10.120	2.353	1	2.353
2	2.606	6.115	10.644	2.553	2	2.553
4	2.700	6.613	11.500	2.749	4	2.749
20	3.067	8.424	13.746	3.206	20	3.206
50	3.481	8.776	15.242	3.466	8.769	14.963

应力与抗压强度呈线性相关, 故起始屈服应力也随着温度的降低和加载速率的增加而增加, 如图 5。

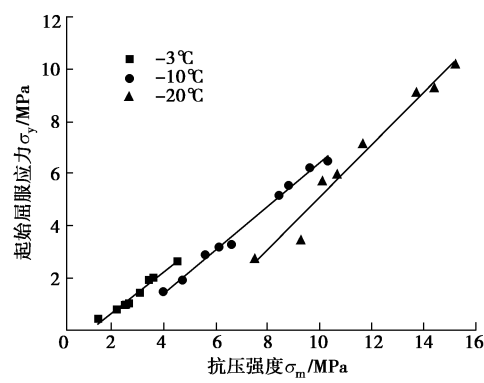


图 4 不同温度和加载速率条件下冻结黏土起始屈服应力和抗压强度关系

Fig. 4 Relationship between initial yield stress and compressive strength under different temperatures and loading rates

表 4 拟合结果

Table 4 Results of fitting			
温度/℃	<i>k</i>	<i>C</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
-3	0.785	-0.908	0.964
-10	0.829	-1.882	0.991
-20	1.001	-4.915	0.966

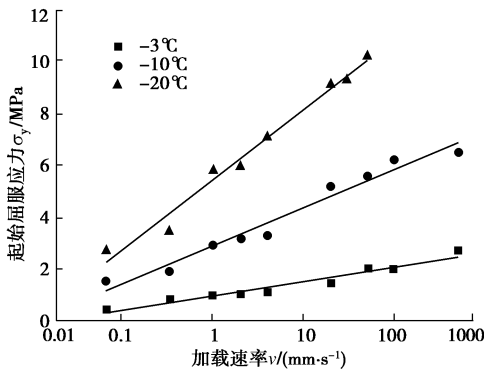


图 5 不同温度条件下起始屈服应力和加载速率的关系

Fig. 5 The relationship of initial yield strength and loading rate under different temperature

3.2 模量特性分析

(1) 起始屈服模量与温度、加载速率的关系

起始屈服模量  $E_0$  可近似地看作是材料的静弹性模量, 或线性模量。在不同温度条件下起始屈服模量随加载速率的变化绘于图 6。由该图可见, 在不同温度和加载速率条件下, 起始屈服模量的差别很大。总体上说, 起始屈服模量是随着温度的降低和加载速率的增加而增加, 且在高温和低加载速率条件下, 起始屈服模量变化较小, 随着温度的降低和加载速率的增大, 其差距逐渐增大。

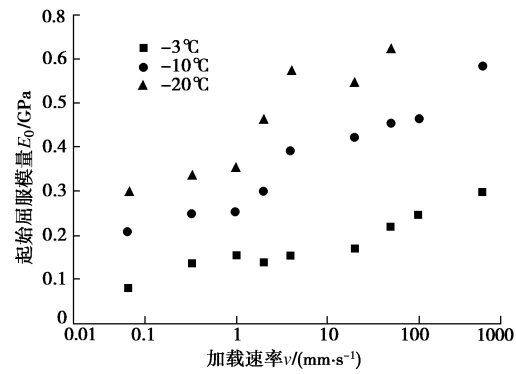


图 6 不同温度条件下起始屈服模量和加载速率的关系

Fig. 6 Relationship between initial yield modulus and loading rate under different temperatures

(2) 切线模量与温度、加载速率的关系

从图1可以看出, 冻结黏土受压后, 其应力 - 应变曲线有一段呈线性关系, 此线性段斜率定义为切线模量  $E_t$ 。图7表示不同温度条件下切线模量与加载速率之间的关系。由该图可见, 在相同温度条件下, 切线模量随着加载速率的增加而增加, 并且随着温度的降低, 增幅明显变大。不同温度条件下切线模量随加载速率的变化趋势基本相同, 发现其与加载速率存在对数函数关系:

$$E_t = m + n \cdot \lg v \quad (5)$$

表 5 为拟合结果, 发现由于温度的不同, 拟合参数变化较大。

表 5 拟合结果

Table 5 Results of fitting			
温度/℃	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
-3	0.158	0.074	0.909
-10	0.396	0.132	0.977
-20	0.663	0.138	0.966

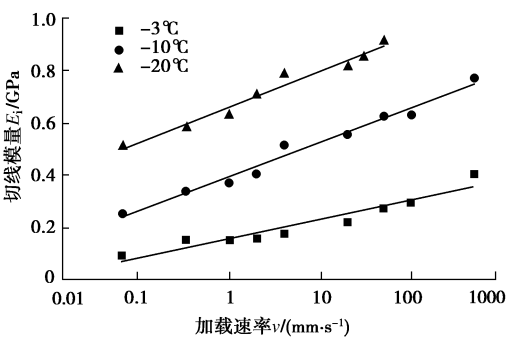


图 7 不同温度条件下切线模量和加载速率的关系

Fig. 7 Relationship between tangent modulus and loading rate under different temperatures

3.3 破坏特性分析

(1) 破坏应变与温度、加载速率的关系

图8表示在不同温度条件下破坏应变与加载速率

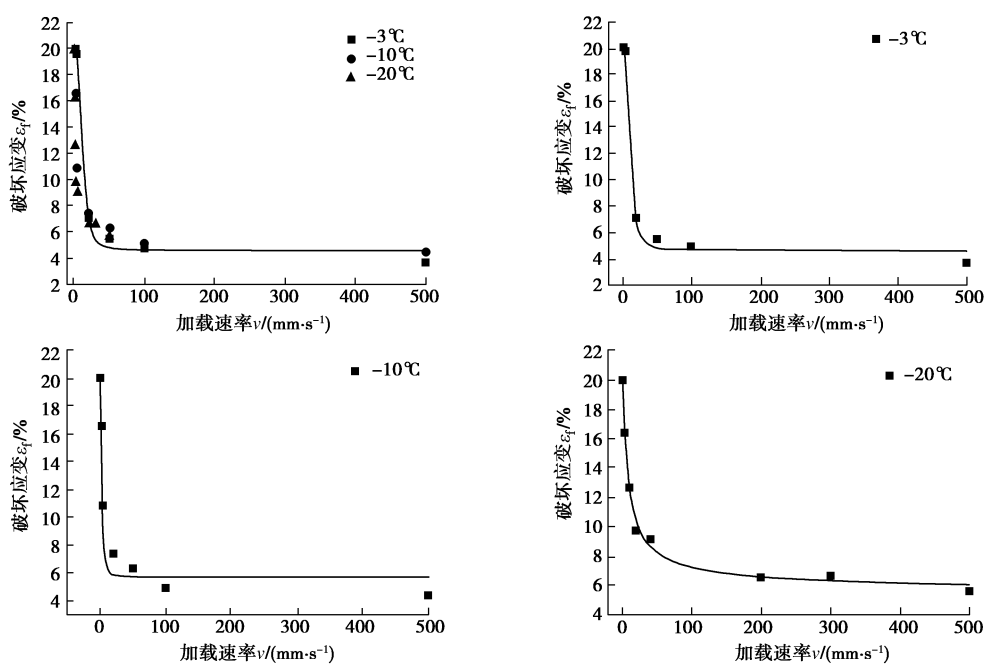


图 8 不同温度条件下破坏应变和加载速率的关系

Fig. 8 Relationships between failure strain and loading rate under different temperatures

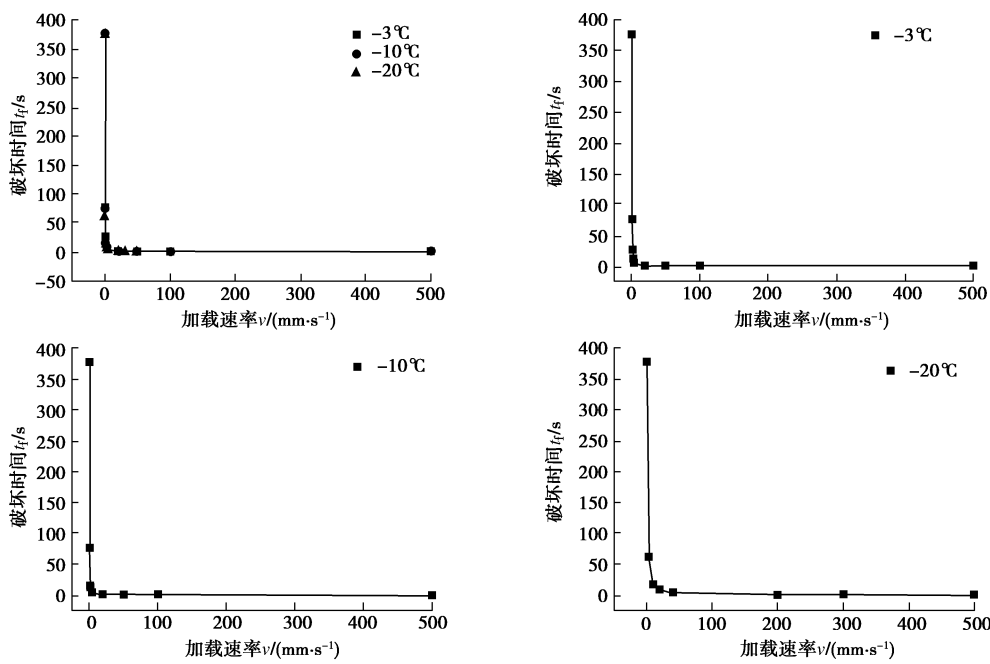


图 9 不同温度条件下破坏时间和加载速率的关系

Fig. 9 Relationships between failure time and loading rate under different temperatures

的变化关系。在一定的加载速率范围内，当冻土的应力 - 应变曲线呈硬化特性时，破坏应变取为20%，当冻土的应力 - 应变曲线呈软化特性时，破坏应变取其抗压强度所对应的应变值。由图形可以看出，破坏应变随着加载速率的增大逐渐减小，并且其对破坏应变的影响越来越小，最终趋于稳定状态，而且似乎存在一个对应于稳定状态的加载速率门槛值，当加载速率大于此门槛值，破坏应变不随加载速率的变化而变化。总体上说，在不同温度条件下加载速率对破坏应变的

影响趋势相同，均可用下式表示：

$$\varepsilon_f = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + (v/v_0)^p) \quad (6)$$

由拟合结果（表 6）可看出，破坏应变受温度、加载速率的影响很大。

（2）破坏时间与温度、加载速率的关系

图9表示不同温度条件下破坏时间随加载速率的变化图。破坏时间的大小主要取决于温度和加载速率，在相同加载速率条件下，温度越低，冻土试样破坏时间越短，这是因为随着温度降低冻土的破坏形式由塑

形破坏转变为脆性破坏；在相同温度条件下，破坏时间随着加载速率的增大而减小。总体来说，不同温度条件下加载速率对破坏时间影响趋势相同，符合幂函数变化规律，可用下式表示：

$$t_f = a' \cdot v^{b'}$$
。(7)

由拟合结果（表 7）可看出：式（7）中  $a'$  值随温度降低而减小，表明冻土破坏形式的变化，而  $b'$  值随温度变化很小，可作为常数。

表 6 拟合结果

Table 6 Results of fitting

温度/℃	$A_1$	$A_2$	$v_0$	$p$	$R^2$
-3	20.053	4.628	11.943	3.180	0.995
-10	20.254	5.688	3.171	2.426	0.978
-20	22.120	5.576	0.670	0.828	0.991

表 7 拟合结果

Table 7 Results of fitting

温度/℃	$a'$	$b'$	$R^2$
-3	25.188	-1.001	0.999
-10	22.535	-1.044	0.999
-20	17.434	-1.138	0.999

4 结 论

为了探讨冻土在较大应变速率情形下的强度和变形特性，分别对-3℃，-10℃，-20℃冻结黏土试样进行不同加载速率条件下的单轴压缩试验，得出以下结论：

（1）随着温度的降低和加载速率的增加，冻结黏土的抗压强度和起始屈服应力逐渐增大，并且温度和加载速率对抗压强度的影响可用下式表示： $\sigma_m = (1.01 + 0.28 \cdot \lg v) \cdot |\theta|^{0.771}$ ，该式能够很好的预测大加载速率下冻结黏土的抗压强度。

（2）在试验条件下，起始屈服应力与抗压强度有很好的线性关系。

（3）通过对模量特性分析，发现起始屈服模量和切线模量受温度和加载速率影响很大，在不同温度条件下，切线模量与加载速率存在着对数函数变化关系。

（4）不同温度条件下，破坏应变和破坏时间随加载速率的增大而减小，破坏应变与加载速率的关系为： $\varepsilon_f = A_2 + (A_1 - A_2)/(1 + (v/v_0)^p)$ ，破坏时间与加载速率符合幂函数变化规律，且在大加载速率下，温度对冻结黏土的破坏应变和破坏时间影响不明显。

参考文献：

[1] H.A 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 等译. 北京: 科学出版社, 1985. (TSYTOVICH H A. The mechanics of frozen groud[M]. Zhang Chang-qing, et al trans. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))

[2] 李蒙蒙, 牛永红, 江 聪, 等. 冻土开挖破碎方法研究现状与展望[J]. 力学与实践, 2016, 38(2): 126 - 133. (LI Meng-meng, NIU Yong-hong, JIANG Cong, et al. Recent progress of excavation and breaking methods for frozen soil[J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(2): 126 - 133. (in Chinese))

[3] HAYNES F D, KARALIUS J A, KALAFUT J. Strain rate effect on the strength of frozen silt[R]. Hanover NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1975.

[4] 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): 35 - 46.

[5] ZHU Y L, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9: 3 - 15.

[6] 李海鹏, 林传年, 张俊兵, 等. 饱和冻结黏土在常应变率下的单轴抗压强度[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 105 - 109. (LI Hai-peng, LIN Chuan-nian, ZHANG Jun-bing, et al. Uniaxial compressive strength of saturated frozen clay at constant strain rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 105 - 109. (in Chinese))

[7] LI H, ZHU Y, ZHANG J, et al. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 39(1): 39 - 45.

[8] 杜海民, 马 巍, 张淑娟, 等. 应变率与含水率对冻土单轴压缩特性影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1373 - 1379. (DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, et al. Effects of strain rate and water content on uniaxial compressive characteristics of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1373 - 1379. (in Chinese))

[9] BB 苏里科夫. 冻土破坏力学[M]. 侯 鑫, 等译. 北京: 科学出版社, 2016. (СУРИКОВ В В. The fracture mechanics of frozen groud[M]. HOU Xin, et al. trans. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))