

DOI: 10.11779/CJGE201403002

# 冻结黏土动态力学特性的 SHPB 试验研究

刘志强<sup>1, 2\*</sup>, 柳家凯<sup>1, 2</sup>, 王 博<sup>1, 2</sup>, 张洪乐<sup>3</sup>, 李幸福<sup>1, 2</sup>

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 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;  
3. 徐州中国矿大岩土工程新技术发展有限公司, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 通过使用分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, 简称 SHPB) 动力学试验, 系统研究了不同应变率、不同温度和不同含水率条件下冻结黏土的动力学特性, 获得了冻结黏土的动态应力-应变关系以及相关冻土动力学参数的变化规律。试验结果表明: 冻土具有明显温度效应和应变率效应, 随着应变率的增加和温度的降低, 冻土破坏过程从塑性破坏逐渐转变为脆性破坏。在冲击荷载作用下, 冻土的动力学应力-应变关系曲线随加载应变率的不同呈现 3 种典型曲线, 冻土的最大应变与且仅与应变率呈线性递增规律; 单一因素影响下, 冻土的动强度、动弹性模量均随应变率的增大、温度的降低和未超过饱和状态的含水率的增大而增加。

**关键词:** 冻结黏土; 冲击荷载; SHPB 试验; 动力学参数

**中图分类号:** TU411.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)03-0409-08

**作者简介:** 刘志强(1964-), 男, 江苏靖江人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程专业矿井建设方面的科研与教学工作。E-mail: liuzqcumt@163.com。

## Dynamic characteristics of frozen clay by using SHPB tests

LIU Zhi-qiang<sup>1, 2</sup>, LIU Jia-kai<sup>1, 2</sup>, WANG Bo<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hong-le<sup>3</sup>, LI Xing-fu<sup>1, 2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (CUMT), Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, CUMT, Xuzhou 221116, China; 3. CUMT Geotechnical Engineering & New Technology Development Co., Ltd., Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests, dynamic characteristics of frozen clay with various low temperatures and water contents at different strain rates are studied. Variations of dynamic parameters and dynamic stress-strain curves of frozen clay are obtained and analyzed. The results of SHPB tests show that the frozen clay exhibits temperature effect and strain rate effect, and that the failure type tends to change from plastic failure to brittle one with the increase of the strain rate or the decrease of the temperature. Under impact load, the frozen clay exhibits three typical dynamic stress-strain curves as the strain rate increases, and the maximum strain of the frozen clay only linearly increases with the strain rate. The increase of strain rate and water content ( $\leq 26.4\%$ ) and the decrease of temperature result in an increase in both the dynamic strength and elastic modulus of the frozen clay considering the effect of a single factor.

**Key words:** frozen clay; impact load; SHPB test; dynamic parameter

## 0 引 言

冻土动力学是冻土力学与动力学的交叉学科, 它主要研究冻土在动荷载作用下的变形和强度特征以及稳定性。随着国民经济的发展及西部大开发的推进, 一系列重大工程建设项目在冻土寒区开展, 人工冻结技术在煤矿立井、深基础基坑、城市地铁及河底、海底隧道等地下工程施工中的应用也日益广泛, 工程条件下冻土体的动力学特性研究是这些寒区工程以及人工冻结工程建设的重要基础研究<sup>[1]</sup>。

针对冻土的动力学性质, 国内外学者已开展了大量的研究工作, 并取得了一系列的成果。何平等<sup>[2]</sup>通

过对饱和冻结粉土的振动试验, 初步总结了冻土动弹性模量、动强度随温度、冻土应变、频率的变化规律。沈忠言等<sup>[3]</sup>对冻结粉土进行了恒应变率增长的等振幅动应变振动试验, 发现不同应变率下的动强度包线形式相似, 与静有效正应力服从抛物线破坏准则, 并依此提出了冻土动强度的预测模型。徐学燕等<sup>[4]</sup>根据冻结粉质黏土的三轴试验数据, 给出了冻土的动弹性模量、动泊松比、动阻尼比的参考值及与温度、振动频

基金项目: 973 计划课题 (2012CB026103)

收稿日期: 2013-04-08

\*通讯作者

率的关系,提出了双曲线型动弹模表达式。马巍等<sup>[5]</sup>通过三轴试验研究了加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响。吴志坚等<sup>[6-7]</sup>基于重塑冻结兰州黄土的动三轴试验,分析了重塑冻结兰州黄土的动本构模型、动弹性模量随温度的变化规律,发现在水-冰剧烈相变区,动弹性模量随温度变化较为明显。赵淑萍等<sup>[8]</sup>对取自青藏铁路的粉质黏土和细砂进行了振动三轴试验,分析了粉质黏土和细砂的动弹性模量和动阻尼比随温度、频率和含水率的变化规律。张淑娟等<sup>[9]</sup>通过大量的恒应力幅循环动荷载试验,发现冻土动强度不仅与破坏振次的大小有关,还与围压、循环荷载作用下土体吸收的有效能量之间存在一定关系。朱占元等<sup>[10]</sup>基于等幅值循环荷载作用下冻土三轴振动试验资料,研究了冻结黏土在长期往返加荷情况下的变形特征。高志华等<sup>[11]</sup>开展了重塑高含冰量的冻土动强度和残余应变的动三轴试验研究。霍明等<sup>[12]</sup>通过三轴抗压强度试验,发现高含冰量冻土的力学性质与初始含水率和温度有密切关系,在温度低于-1℃时存在最不利含水率。

部分学者采用超声波法对冻土的动力学指标进行了研究。凌贤长等<sup>[13]</sup>就负温和含水率对超声波在冻土中传播速度及冻土动弹性力学指标的影响进行了分析。王大雁等<sup>[14]</sup>用超声波法测得:在低含水率范围内,冻土的动弹性模量和动剪切模量随含水率的增加而增加;在高含水率范围内,规律则相反。姚博等<sup>[15]</sup>利用超声纵波测量冻土动弹性模量试验,得到冻结粉质黏土的动弹性模量随含水率的减小或温度的降低而增大,泊松比随温度升高或含水率增加而增大的结论。

对于冻土受爆破等冲击荷载作用下的力学特性,俞祁浩等<sup>[16]</sup>对兰州冻土的冲击韧度进行了试验研究,结果表明冲击速度对冲击韧度具有明显的影响。Lee等<sup>[17]</sup>针对美国阿拉斯加地区多年冻土进行了-40℃下冲击荷载动态压缩试验研究,并引入 Johnson-Cook 模型描述冻土的动态本构关系。马芹永等<sup>[18]</sup>通过冻土凿碎比能试验,发现凿碎比能随着冲击韧度的增加而增大,且在冲击韧度一定的情况下,随着凿入次数的增加,凿碎比能增加值逐渐减小。陈柏生等<sup>[19]</sup>采用冻结法凿井中的人工冻结黏土进行了单轴冲击试验,指出冻土在冲击荷载作用下具有明显的温度和应变率效应。

以上研究成果无疑为冻土工程建设提供了有利的科学依据。然而,综合分析以上研究成果可知,针对冻土动力学性能的研究成果大多集中在低频或小幅值的振动加载下的情况,有关冻土在冲击荷载下高应变率动态力学特性的研究还十分有限。SHPB 试验是一种常用的材料动力学性能试验方法,能获得材料在高

应变率下的动态力学性能,在混凝土、金属、高分子材料等领域已有广泛应用。本文即通过引入 SHPB 试验测试冻土在高应变率下的动态力学特性,研究冲击荷载作用下冻土动弹性模量、动强度等动力学性能指标的演变规律,进一步探讨冻土表现出的温度效应和应变率效应,为寒区工程及人工冻结工程建设提供必要的理论基础和科学依据。

### 1 SHPB 试验系统

试验采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 SHPB 动力学试验系统,如图 1 所示,该试验系统由动力加载单元、速度计时单元、数据采集和处理单元等部分组成。

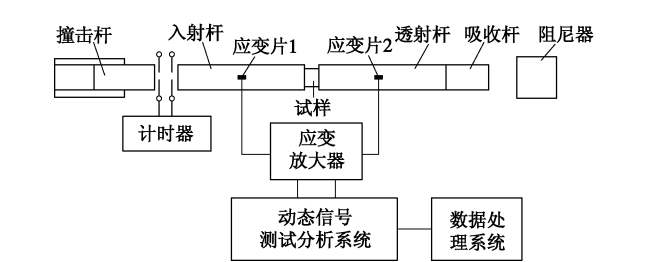


图 1 SHPB 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB test system

### 2 试验规划与实施

#### 2.1 试样制作

试验土样为取自冻结法施工现场的深部黏土,干密度为 1.59 g/cm<sup>3</sup>,详细物理性质指标见表 1。

表 1 土样参数

Table 1 Soil parameters

土性	干密度	比重	塑限	液限	塑性指数
黏土	1.59	2.74	24.7%	57.4%	32.7

试样采用重塑黏土制备,试样尺寸为 34 mm×18 mm,分别配置了含水率为 22%和饱和状态(含水率为 26.4%)的两种重塑土样。非饱和土制样方法:首先将经过晒干、粉碎并剔去杂质的黏土配成规定含水率 22%的土样,均匀搅拌后装入密封塑料袋在保湿玻璃器皿中静置 6 h 以上使土的含水率及结构均匀,然后再进行二次搅拌并将土样均分成 3 份,分层装入模具,每层锤击 10 次。对制成的试样称重,要求试样质量变化不超 1 g。饱和土制样方法:将装制好的非饱和土样随模具放入真空饱和缸中饱和 24 h 使土样达到饱和状态。以上制作好的试样与金属模具一起放入高低温试验箱中-20℃负温下快速冷冻 24 h 后拆模,拆模后的冻土试样在不同试验温度下恒温 24 h,冻土试样制备完成,可供冻土 SHPB 试验使用。

2.2 试样恒温装置

试验过程中需要保证冻土试样的温度恒定, 为此在原有 SHPB 试验系统上安设了一套利用高低温恒温液浴循环设备设计的冻土试样恒温装置, 冻土试样恒温装置简图如图 2 所示。

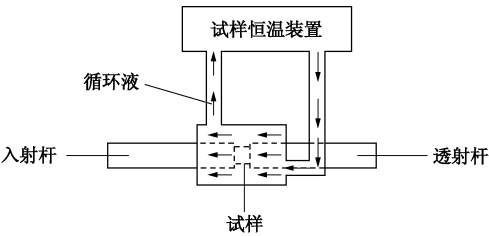


图 2 试样恒温装置简图

Fig. 2 Schematic of thermostat for frozen specimen

2.3 试验规划与实施

文中无侧限 SHPB 冲击压缩试验共进行了不同温度、不同含水率和不同应变率条件下的 52 组试验, 具体试验安排见表 2。

表 2 SHPB 试验安排

Table 2 Arrangement of SHPB tests

控制因素		取值					
温度 $T$		$-1^{\circ}\text{C}$		$-5^{\circ}\text{C}$		$-10^{\circ}\text{C}$	
含水率 $w$		22%	饱和	22%	饱和	22%	饱和
应变率 $\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	75	40	125	75	75	75	
	100	75	150	75	100	75	
	100	75	150	75	100	100	
	125	200	150	100	125	175	
	125	200	200	350	125	275	
	150	250	250	350	150	350	
	200	325	300	350	175		
	200	325	300		200		
	225	350	400		400		
	325				600		
	350						

如图 1 所示, SHPB 试验中冻土试样放在入射杆和透射杆之间, 由制冷恒温装置保持冻土试样温度恒定, 试验时控制撞击杆以一定的初速度沿轴向撞击入射杆, 在入射杆中产生一个入射脉冲  $\varepsilon_i$ , 应力波到达试样时将同时产生反射脉冲  $\varepsilon_r$  返回入射杆和透射脉冲  $\varepsilon_t$  进入透射杆, 入射杆与透射杆中的脉冲信号分别通过应变片 1 和应变片 2 来测量, 利用记录下的应变脉冲可计算冻土试样的动态应力 - 应变曲线。为有效控制 SHPB 试验加载速率, 实现对冻土试样的常应变率加载, 本文中试验采用了双试件 SHPB 方法<sup>[20]</sup>, 即在入射杆前端添加一个与试样尺寸和材料均相同的试件来实现, 试验结果表明这种方法可较好的实现对冻

土试样的常应变率加载。

3 试验结果分析

将采集到的波形数据进行波形光滑滤波、确定基线、对齐波峰后可得试验结果的原始波形, 如图 3 所示。

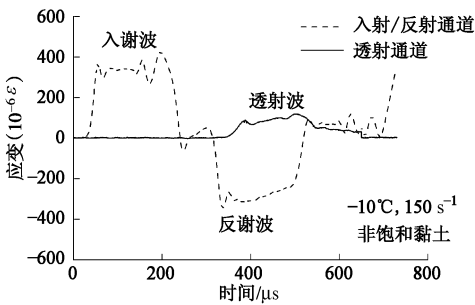


图 3 原始波形图

Fig. 3 Diagram of primitive waveform

根据弹性杆中一维应力波的传播理论, 可得计算试件应力  $\sigma$ , 应变  $\varepsilon$  和应变率  $\dot{\varepsilon}$  的三波公式:

$$\sigma(t) = \frac{EA}{2A_0}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad , \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad , \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad . \quad (3)$$

式中  $E$ ,  $A$ ,  $c$  分别为压杆的弹性模量、横截面积、应力波波速;  $l_0$ ,  $A_0$  为试件长度和横截面积;  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$  分别为试件的入射脉冲、反射脉冲和透射脉冲;  $t$  为时间。

通过三波公式即可计算得到冻土试样的动态应力 - 应变数据, 如图 4, 5 所示。

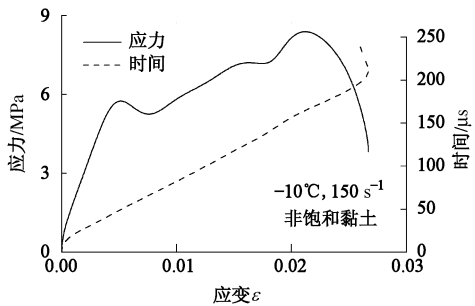


图 4 应力 - 应变曲线和应变 - 时间曲线

Fig. 4 Curves of stress-strain and strain-time

图 4 中冻土试样破坏前其应变 - 时间关系曲线基本呈线性, 图 5 中冻土试样应变率在加载初期瞬间上升到一极值后, 也基本保持不变, 较好的实现了试样常应变率加载的试验要求。

采用上述数据处理方法, 试验获得了 3 种温度、

不同应变率条件下的冻结饱和和含水率为 22% 的黏土试样的动态应力 - 应变关系。根据 SHPB 试验后冻土试样的破坏形式, 文中归纳了 4 种冻土试样破坏形式并分别定义为无明显破裂、微裂、破裂和粉碎, 如图 6 所示。

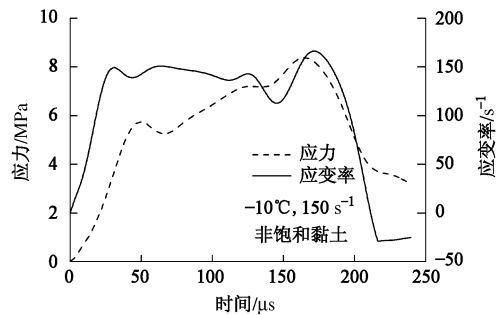


图 5 应力 - 时间曲线和应变率 - 时间曲线  
Fig. 5 Curves of stress-time and strain rate-time

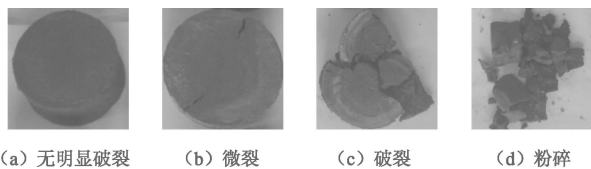


图 6 冻土试样破坏形式

Fig. 6 Collapse of specimens after tests

### 3.1 应变率的影响

取冻土试样应力 - 应变关系曲线中, 应力第一次达到极大值时的应力为冻土试样的动强度。依此, 图 7 给出了不同温度下冻土试样的动强度与加载应变率的变化关系。

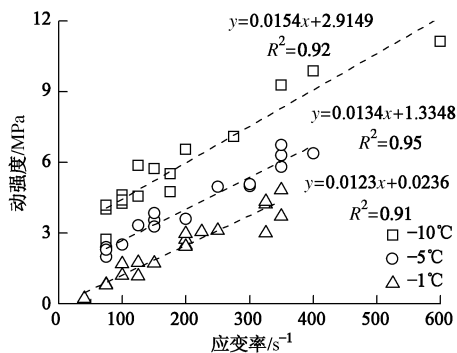


图 7 不同温度下冻土的动强度与应变率的关系

Fig. 7 Relations between dynamic strength and strain rate of frozen soils under different temperatures

由图可知, 冻结黏土试样在冲击荷载作用下表现出明显的应变率效应, 不同温度下冻土动强度随应变率的变化趋势相同, 均随应变率的增大而线性增加, 可用线性方程对试验数据进行拟合:

$$\sigma_d = a\dot{\varepsilon} + b \quad (4)$$

式中  $\sigma_d$  为动强度 (MPa);  $\dot{\varepsilon}$  为应变率 ( $s^{-1}$ );  $a$ ,  $b$

为与拟合直线相关的系数 ( $MPa \cdot s$ ,  $MPa$ ), 拟合值见表 3。

表 3 拟合参数  $a$ ,  $b$

Table 3 Parameters of  $a$  and  $b$

温度 $T$	-1℃	-5℃	-10℃
$a$	0.0123	0.0134	0.0154
$b$	0.0236	1.3348	2.9149

由表 3 可以看出: 温度对参数  $a$  的影响不大, 因此可取 3 种温度下的平均值  $a=0.0137$ ,  $a$  反映应变率对冻土动强度的影响; 温度对参数  $b$  的影响较大, 且  $b$  值随温度的降低呈线性增加, 可用下式表示

$$b = -0.321T - 0.2878 \quad (T \leq -1^\circ\text{C}), \quad (5)$$

式中,  $T$  为温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $b$  反映温度对冻土动强度的影响。

将式 (5) 代入式 (4), 即可得冻土动强度随应变率和温度变化的关系表达式:

$$\sigma_d = 0.0137\dot{\varepsilon} - 0.321T - 0.2878 \quad (\dot{\varepsilon} \leq 600s^{-1}, T \leq -1^\circ\text{C}). \quad (6)$$

为检验公式的正确性, 图 8 中横坐标为试验实测动强度, 纵坐标为采用式 (6) 的计算动强度。由图 8 可以看出, 数据集中在直线  $y=x$  附近, 式 (6) 的计算结果与试验结果吻合度较好。

必须指出的是, 由于式 (6) 是通过试验数据的回归分析得到的, 其适用于试验条件下冻结黏土动强度的精确计算, 后续为提高计算结果的适用性和准确性需进一步开展研究工作。

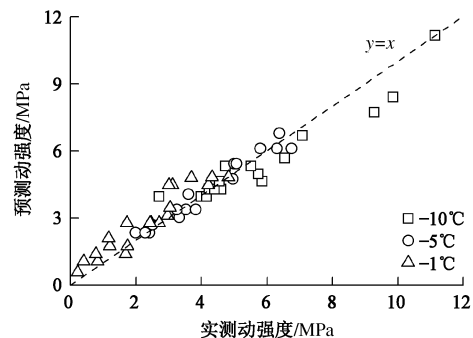


图 8 实测动强度 - 预测动强度

Fig. 8 Measured and predicted dynamic strengths of frozen soils

图 9 中归纳了试验后冻土试样的最大应变与应变率的关系。可以看出, 温度、含水率对冻土试样的最大应变的影响可以忽略, 最大应变仅与应变率有很好的相关性, 随应变率线性递增, 递增关系可用下式表示

$$\varepsilon_{\max} = 0.02\dot{\varepsilon} \quad (7)$$

式中,  $\varepsilon_{\max}$  为 SHPB 试验中冻土试样的最大应变。

如前所述, 冻土试样在试验后表现出 4 种破坏形式: 无明显破裂、微裂、破裂和粉碎 (见图 6)。图 10 对不同破坏形式试样的加载应变率进行了统计。

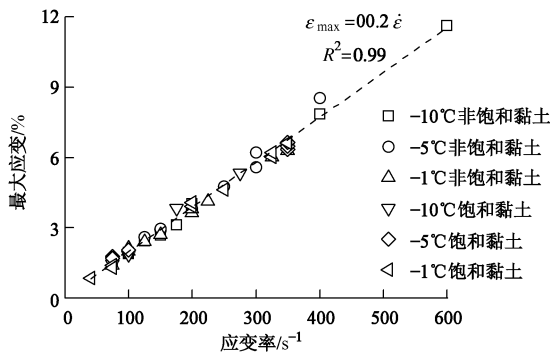


图9 冻土的最大应变与应变率关系曲线

Fig. 9 Relations between maximum strain and strain rate of frozen soils

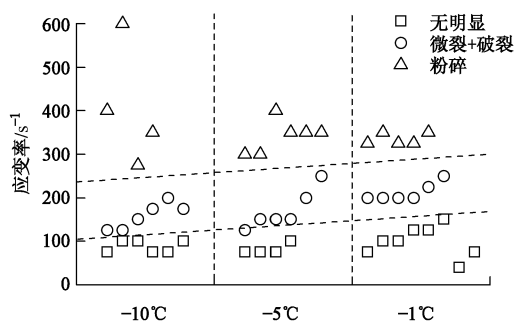


图10 不同温度不同应变率下冻土的破坏形态分布图

Fig. 10 Distribution of damage form of frozen soils under different temperatures and strain rates

从图10中可以看出,加载应变率是导致冻土试样表现出不同破坏形式的主要原因,随着应变率的增加,冻土试样的破坏形式从无明显破裂逐渐转变为粉碎性破裂,不同破坏形式间具有明显的应变率界限,且随着温度的升高,界限应变率略有增加。如图10所示,对于 $-10^{\circ}\text{C}$ 冻土,应变率在 $125\text{ s}^{-1}\sim 200\text{ s}^{-1}$ 范围内,冻土呈现微裂和破裂的破坏形态;对于 $-5^{\circ}\text{C}$ 和 $-1^{\circ}\text{C}$ 的冻土,应变率分别在 $125\text{ s}^{-1}\sim 250\text{ s}^{-1}$ 范围内和 $150\text{ s}^{-1}\sim 250\text{ s}^{-1}$ 范围内,冻土才表现出相似的破坏形式。本文依此对冻土试样表现出不同破坏形式的应变率范围进行了界定:定义小于 $125\text{ s}^{-1}$ 为低应变率,冻土呈现无明显破裂; $125\text{ s}^{-1}\sim 250\text{ s}^{-1}$ 为中应变率,冻土呈现微裂和破裂的破坏形态;大于 $250\text{ s}^{-1}$ 为高应变率,冻土呈现粉碎性破坏,这里并未考虑温度的影响。试验结果表明冻土具有明显的应变率效应,即随着应变率的增加,表现为动脆性。

进一步分析3种应变率范围内的冻土动态应力-应变关系可以发现,每种应变率范围内的冻土动态应力-应变关系曲线具有明显的共同特征,可分为3种典型曲线,见图11。

#### (1) 低应变率、塑性破坏

此时,冻土动态应力-应变关系表现为图11中曲

线a模式,在低应变率作用下冻土试样的应力随应变逐渐增大,应力-应变曲线没有明显的屈服阶段,冻土试样没有明显的破裂面,表现为塑性破坏。

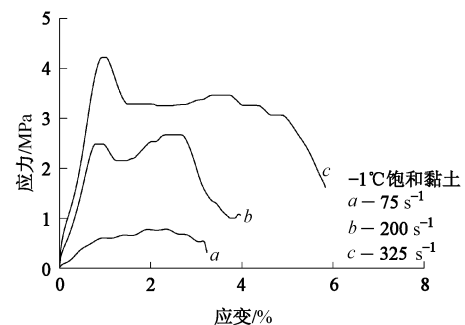


图11 3种典型冻土动态应力-应变曲线

Fig. 11 Three typical curves of dynamic stress-strain of frozen soil

#### (2) 中应变率、脆-塑性破坏

在中应变率作用下,冻土动态应力-应变关系表现为图11中曲线b模式,应力随应变增大到峰值应力时,冻土体会产生一些细小裂缝,应力急剧降低至一极小值,之后应力随应变又有增大趋势,表现为屈服型硬化,达到一定值之后应力逐渐降低至破坏。此时,冻土试样表现为脆-塑性破坏。

#### (3) 高应变率、脆性破坏

在高应变率作用下,如图11中曲线c,当应力达到峰值应力时,冻土试样产生破裂面,应力急剧降低,冻土表现为脆性破坏。但是,峰值应力后冻土试样并没有完全丧失承载能力,应力应变曲线表现为在一定值附近波动,下降缓慢。

同时,从图11中还可以看出,冻土的动弹性模量、峰值应力与最大应变均随加载应变率的增大而增大,同样反映了冻土的应变率效应。一般认为,荷载作用下冻土破坏是由于其内部裂纹的萌生扩展导致的。随着应变率的增大,冻土试样内部裂纹从来不及充分发展到在各局部区域内同时扩展,同时扩展的裂纹数量大大增加表现为吸收的能量增加,进而峰值应力最大应变增加,是冻土应变率效应的内在机理。

### 3.2 温度的影响

温度对冻土的动力学性能影响很大。图12给出了同一应变率( $350\text{ s}^{-1}$ )、不同温度下的饱和冻结黏土试样的动态应力-应变关系曲线。由图可知,在相同含水率和应变率条件下,温度越低,冻土动弹性模量和峰值应力越大。通常,随着温度的降低,冻土的含冰率增大,土颗粒间的冰胶结能力增强,从而使冻土强度提高。然而,冻土试样的最大应变并没有随温度的不同而发生变化,不同温度下的应力-应变曲线表现出汇聚现象,汇聚趋向于温度高(图中为 $-1^{\circ}\text{C}$ )的应力-应变曲线。对于其他应变率水平和非饱和冻结黏

土的应力-应变曲线也表现出同样的汇聚现象,说明汇聚现象是冻土温度效应的一种体现<sup>[19]</sup>。

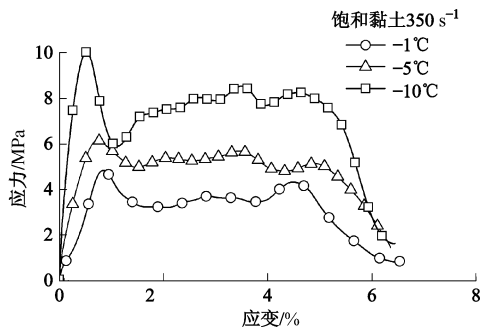


图 12 冻土在不同温度下的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of frozen soils with different temperatures

由图 12 还可以看出,随着温度的降低,应力-应变曲线中峰值应力对应的冻土破坏应变逐渐降低,这与冻结黄土的破坏应变随温度的变化规律一致<sup>[21]</sup>。为进一步量化分析温度对冻土动强度的影响,图 13 为试验获得的饱和冻结黏土在不同应变率下的温度与动强度关系曲线。由图 13 可知,冻土动强度随温度降低大致呈线性增加趋势。

从以上分析可以看出,冻土不仅具有明显的应变率效应,表现为动脆性,而且冻土具有明显的温度效应,随着温度的降低,表现为冻脆性,即低温对应于高应变率,高温对应于低应变率。冻土所表现出的这种应变率效应和温度效应统称为时温等效性,时温等效性是冻土动态力学特性的显著特征。

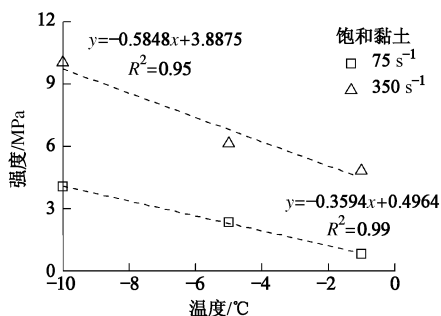


图 13 不同应变率下冻土温度与动强度的关系

Fig. 13 Relations between dynamic strength of frozen soils and temperature at different strain rates

### 3.3 含水率的影响

含水率是影响冻土力学性质的重要因素。当土体冻结后,土中水冻结成冰,由于冰的胶结作用,冻土强度增加,且不同含水率下冻土的力学性质有很大差异。图 14 给出了同一温度(-10°C)、不同含水率下的冻结黏土的动态应力-应变关系曲线。

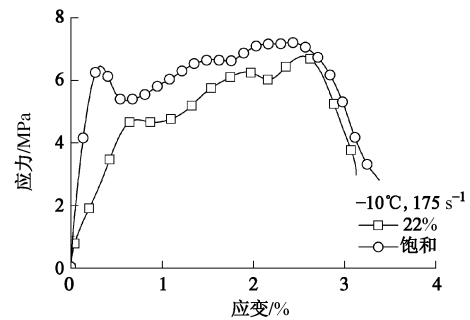


图 14 冻土不同含水率的应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curves of frozen soils with different water contents

从图 14 可知, -10°C 饱和和冻结黏土的动弹性模量和峰值应力要大于非饱和(含水率 22%)冻结黏土。一般而言,初始含水率越大,土体冻结后孔隙中冰晶体的含量就越多,土颗粒间的冰胶结面积也越大,所以饱和冻土的动弹性模量和峰值应力要大于含水率为 22% 的非饱和冻土。

然而,冻土动弹性模量和动强度并不是随含水率的增加而单调增大的。已有学者研究发现<sup>[8, 14, 22]</sup>,冻土的动弹性模量和强度随初始含水率的增加,先增加后降低,且在饱和含水率附近达到最大。这是因为在未达到饱和状态前,随着含水率的增大,土颗粒间冰晶体增多,冰胶结作用逐渐增强,因此冻土的动弹性模量和强度随之增大;当含水率超过饱和状态后,随着含水率继续增加,冻土中过剩的冰晶体会挤开土颗粒,破坏土颗粒间的连结作用,使得冻土的动弹性模量和强度随含水率的继续增大而减小。本文中冻土试样的含水率并未超过饱和状态,所以在同一温度下冻土的动弹性模量和动强度随着含水率的增大而增大。就含水率对冻土动力学特性的影响,在本文的后续工作中会进一步开展试验工作。

## 4 结 论

通过对冻结黏土在不同温度、含水率和加载应变率条件下的 SHPB 试验结果分析,可以得出以下结论:

(1) 冻土具有明显的应变率效应,随着应变率的增加,冻土破坏过程从塑性破坏逐渐转变为脆性破坏,体现为动脆性;冻土的动态应力-应变关系随应变率变化呈现 3 种典型曲线:①低应变率( $\dot{\epsilon} \leq 125 \text{ s}^{-1}$ )塑性破坏;②中应变率( $125 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} \leq 250 \text{ s}^{-1}$ )脆-塑性破坏型;③高应变率( $\dot{\epsilon} > 250 \text{ s}^{-1}$ )脆性破坏。

(2) 试验结果表明,冻结黏土的动强度、动弹性模量均随应变率的增大而呈线性增加趋势。冲击荷载作用下,冻土的最大应变与且仅与应变率呈线性递增规律。

(3) 相同应变率条件下, 冻土的动强度和动弹性模量随温度的降低大致呈线性增加趋势, 反映出冻土的温度效应。不同温度下的冻土动态应力 - 应变关系表现出汇聚现象, 汇聚趋向于温度高的应力 - 应变曲线, 具有冻脆性。

(4) 相同温度和应变率条件下, 当含水率未超过饱和状态时冻结黏土动强度和动弹性模量随着含水率的增大而增大。就含水率对冻土动力学特性的影响本文只有有限的试验结果, 在后续工作中需进一步开展试验研究。

### 参考文献:

- [1] 马芹永. 人工冻土动态力学特性研究现状及意义[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊): 10 - 14. (MA Qin-yong. Research status of dynamic properties of artificial frozen soil and its significance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S0): 10 - 14. (in Chinese))
- [2] 何平, 朱元林, 张家懿, 等. 饱和冻结粉土的动弹模与动强度[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 170 - 174. (HE Ping, ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, et al. Dynamic elastic modulus and dynamic strength of saturated frozen silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(1): 170 - 174. (in Chinese))
- [3] 沈忠言, 张家懿. 冻结粉土的动强度特性及其破坏准则[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(2): 141 - 148. (SHEN Zhong-yan, ZHANG Jia-yi. Dynamic strength characteristics and failure criterion of frozen silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(2): 141 - 148. (in Chinese))
- [4] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数的确定[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(5): 77 - 81. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 77 - 81. (in Chinese))
- [5] 马巍, 常小晓. 加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 536 - 566. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Influence of loading and unloading on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 536 - 566. (in Chinese))
- [6] 吴志坚, 王兰民, 马巍, 等. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, 2003, **25**(3): 210 - 214. (WU Zhi-jian, WANG Lan-min, MA Wei, et al. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, **25**(3): 210 - 214. (in Chinese))
- [7] 吴志坚, 马巍, 王兰民, 等. 地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(6): 648 - 652. (WU Zhi-jian, MA Wei, WANG Lan-min, et al. Laboratory study on the effect temperature and confining pressure on strength of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(6): 648 - 652. (in Chinese))
- [8] 赵淑萍, 朱元林, 何平, 等. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊 2): 2677 - 2681. (ZHAO Shu-ping, ZHU Yuan-lin, HE Ping, et al. Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2677 - 2681. (in Chinese))
- [9] 张淑娟, 赖远明, 李双洋, 等. 冻土动强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 595 - 598. (ZHANG Shu-juan, LAI Yuan-ming, LI Shuang-yang, et al. Dynamic strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 595 - 598. (in Chinese))
- [10] 朱占元, 李静, 邹祖银, 等. 动力荷载作用下冻土变形特性研究[J]. 低温建筑技术, 2008(2): 112 - 114. (ZHU Zhan-yuan, LI Jing, ZOU Zu-yin, et al. Study on deformation characters of frozen soil under long-term dynamic loading[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(2): 112 - 114. (in Chinese))
- [11] 高志华, 石坚, 张淑娟, 等. 高含冰量冻土动强度和残余应变的试验研究[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(6): 1143 - 1149. (GAO Zhi-hua, SHI Jian, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental study of the dynamic strength characteristics and residual strain of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(6): 1143 - 1149. (in Chinese))
- [12] 霍明, 汪双杰, 章金钊, 等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. 水利学报, 2010, **41**(10): 1165 - 1172. (HUO Ming, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(10): 1165 - 1172. (in Chinese))
- [13] 凌贤长, 徐学燕, 徐春华, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 456 - 459. (LING Xian-chang, XU Xue-yan, XU Chun-hua, et al. Study on frozen Harbin silty clay through its measuring tests of ultrasonic velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 456 - 459. (in Chinese))

- Engineering, 2002, **24**(4): 456 - 459. (in Chinese))
- [14] 王大雁, 朱元林, 赵淑萍, 等. 超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 612 - 615. (WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, ZHAO Shu-ping, et al. Study on experiment determination of the dynamic elastic mechanical parameters of frozen soil by ultrasonic technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 612 - 615. (in Chinese))
- [15] 姚 博, 刘志强, 王 博, 等. 超声纵波测量冻土动弹性模量的试验研究[J]. 中国建材科技, 2009(3): 85 - 88. (YAO Bo, LIU Zhi-qiang, WANG Bo, et al. Experimental study of ultrasonic longitudinal wave measuring dynamic elastic modulus of frozen soil[J]. China Building Materials Science & Technology, 2009(3): 85 - 88. (in Chinese))
- [16] 俞祁浩, 朱元林, 张健民, 等. 冲击速度对冻土冲击韧度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(4): 21 - 24. (YU Qi-hao, ZHU Yuan-lin, ZHANG Jian-min, et al. Effect of pendulum speed on impact toughness of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(4): 21 - 24. (in Chinese))
- [17] LEE Moo Y, ARLO Fossum, LAURENCE S Costin, et al. Frozen soil material testing and constitutive modeling[R]. Sandia Report, SAND, 2002-0524.
- [18] 马芹永, 张志红, 蔡美峰. 冻土冲击韧度与凿碎比能关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(1): 54 - 58. (MA Qin-yong, ZHANG Zhi-hong, CAI Mei-feng. Experimental research on relationship between impact toughness and impact penetrant specific energy of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(1): 54 - 58. (in Chinese))
- [19] 陈柏生, 胡时胜, 马芹永, 等. 冻土动态力学性能的实验研究[J]. 力学学报, 2005, **37**(6): 724 - 728. (CHEN Bo-sheng, HU Shi-sheng, MA Qin-yong, et al. Experimental research of dynamic mechanical behaviors of frozen soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, **37**(6): 724 - 728. (in Chinese))
- [20] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, **24**(5): 413 - 418. (TAO Jun-lin, TIAN Chang-jin, CHEN Yu-ze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, **24**(5): 413 - 418. (in Chinese))
- [21] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 模拟人工冻结凿井状态下冻土强度特性研究[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(2): 168 - 172. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Study on the strength characteristics of frozen soil in artificial freezing sinking[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 168 - 172. (in Chinese))
- [22] 何 平, 程国栋, 杨成松, 等. 非饱和冻土的强度分析[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 260 - 263. (HE Ping, CHENG Guo-dong, YANG Cheng-song, et al. Analysis of strength of unsaturated frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 260 - 263. (in Chinese))