

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0475

冻融循环冻土的冲击动态力学性能*

李 斌¹, 朱志武^{1,2}, 李 涛¹

(1. 西南交通大学力学与航空航天学院四川省应用力学与结构安全重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 中国科学院西北生态环境与资源研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以典型冻土为研究对象, 通过不同冻融循环次数的冻融循环实验、不同温度的冻结实验以及不同应变率的冲击动态实验, 综合研究了冻融循环冻土的冲击动态力学性能。结果表明, 冻土存在冻融循环效应, 随着冻融循环次数的增加, 冻土的峰值应力有一定程度的降低, 但在达到临界冻融循环次数后, 峰值应力将维持稳定; 同时, 冻土表现出明显的应变率效应和温度效应, 其峰值应力随应变率的增加或温度的降低而增加。通过定义冻融损伤因子, 推导满足 Weibull 分布的冲击损伤, 提出了一个基于 Z-W-T 方程的损伤黏弹性本构模型。该模型可较好地描述冻融循环后冻土的冲击动态力学行为, 为研究季节性冻土区冻土的冲击动态破坏提供参考。

关键词: 冻土; 冻融循环; 冲击; 损伤; 本构模型

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Impact dynamic mechanical properties of frozen soil with freeze-thaw cycles

LI Bin¹, ZHU Zhiwu^{1,2}, LI Tao¹

(1. *Applied Mechanics and Structural Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

2. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: During engineering construction and service in seasonally frozen soil regions, frozen soil is often subjected to the combined action of freeze-thaw (F-T) cycles and impact loading, which changes its physical state and mechanical properties. In order to explore the effect of F-T cycles on the impact dynamic mechanical properties of frozen soil, in this paper, the typical frozen soil was taken as the research object, and the effect of F-T cycles on the impact dynamic mechanical properties of frozen soil was comprehensively studied with the help of high and low temperature F-T cycles experimental equipment and a split Hopkinson pressure bar device, through F-T cycles experiments with different F-T cycles numbers, freezing experiments at different temperatures, and impact dynamic experiments with different strain rates. The results shows that there is an F-T cycles effect in frozen soil. With the increase of the number of F-T cycles, the peak stress of frozen soil decreases to a certain extent, but after reaching the critical number of F-T cycles, the peak stress remains stable. According to the hydrostatic pressure theory, it is believed that the F-T cycles mainly changes the mechanical properties of frozen soil by changing its microstructural characteristics. Meanwhile, the frozen soil also exhibits obvious strain rate effect and temperature effect, and its peak stress increases with the increase of strain rate or the decrease of temperature. The F-T damage factor was defined by the peak stress, and the impact damage was deduced by a statistical method that it assumes the microstructure strength of frozen soil satisfies the Weibull distribution, a damage viscoelastic constitutive model based on the Z-W-T equation was proposed.

* 收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(11972028); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682018CX44);
冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201918)

第一作者: 李 斌(1997—), 男, 博士研究生, 1915732310@qq.com

通信作者: 朱志武(1974—), 男, 博士, 教授, zzw4455@163.com

The model can better describe the impact dynamic mechanical behavior of frozen soil after F-T cycles and provide reference for the impact dynamic damage of frozen soil in seasonally frozen soil regions.

Keywords: frozen soil; freeze-thaw cycle; impact; damage; constitutive model

当位于寒区地面表层的土壤温度低于零摄氏度时, 土壤内的部分孔隙水会凝结成冰颗粒, 形成由固体土颗粒、液态水、冰颗粒以及气体组成的四相非均质复合材料——冻土。冻土广泛分布在世界各地, 约占陆地总面积的 24 %^[1]。根据冻结持续时间的不同, 冻土可被分为短时冻土、季节性冻土以及永久冻土。由于气候原因, 我国西部土地大多属于季节性冻土区^[2]。随着西部大开发等工程的建设实施, 季节性冻土区的冻土常常遭受到爆炸、撞击等冲击载荷的作用, 同时, 由于温度起伏较大的昼夜交替和四季变换, 冻土不可避免地会受到冻融循环的作用。因此, 研究冲击载荷与冻融循环共同作用下冻土的动态力学性能具有重要意义。

目前, 关于冻融循环对土体力学性质影响的研究主要集中在破坏强度、弹性模量、基本物理性质以及应力-应变行为等准静态力学性能方面。马巍等^[3]在对石灰粉土开展实验研究时, 发现反复冻融作用会使石灰粉土的破坏强度大幅减弱。Lee 等^[4]通过对路基土的冻融循环实验, 证明了冻融循环会弱化土体的回弹模量。王大雁等^[5]研究了冻融作用对青藏黏土物理学性质的影响, 发现土体在经历冻融循环后, 弹性模量明显降低, 并且在首次冻融循环后土体弹性模量降低的幅度最大。Hotineanu 等^[6]通过黏土的冻融循环实验, 发现随着冻融循环次数的增加, 黏土的摩擦角增加, 黏聚力降低, 剪切强度降低。苏谦等^[7]进行了青藏斜坡黏土冻融作用下物理性质的实验研究, 结果表明, 经历一定次数(10 次)的冻融循环后, 其黏聚力和内摩擦角等基本物理量会逐渐趋于稳定, 并且冻融的最终稳定状态与冻融前的初始状态密切相关, 其中初始干密度的影响尤为重要。穆彦虎等^[8]通过大量黏质粗颗粒土的冻融循环实验, 发现冻融循环作用对黏质粗颗粒土的应力-应变曲线形态具有一定的影响, 可使其由未冻融的应变软化向应变硬化转变。同时, 齐吉琳等^[9]指出土的类型、土工实验中所采用的应力路径和排水路径都会对冻融循环后土体的应力-应变特性产生影响。

此外, 冻融循环后冻土的力学性质也有相关研究。Zhou 等^[10]通过一系列三轴压缩、蠕变以及应力松弛实验研究了冻融循环对冻结黄土力学行为的影响, 结果表明, 冻融循环对冻结黄土的强度、刚度和黏度特性都有一定程度的劣化影响, 并且在冻融循环过程中存在一个冻融次数的临界值, 当冻融次数达到或超过这个临界值后, 冻结黄土的力学性质将不再随冻融循环次数的增加而改变。Xu 等^[11]对承受不同冻融循环次数的冻结黏土进行了动三轴实验, 研究了冻融循环次数对冻结黏土动态力学特性的影响, 并确定了冻结黏土动态力学特性达到稳态的临界循环次数。Fan 等^[12]研究了不同围压、循环荷载振幅和冻融循环情况下冻结黏土的动力学响应, 并提出了一个可以定量描述耦合效应对冻结黏土永久变形影响的经验公式。

在冻土工程的建设与服役过程中, 冻土不可避免地会受到爆破、冲击等强动载荷的作用。一些学者已从实验、理论以及数值模拟等方面对常规冻土的冲击动力学性能进行了研究。Lee 等^[13]进行了不同初始密度、不同应变率以及不同温度条件下冻土的冲击动态压缩实验, 发现冻土的材料特性很大程度上取决于初始密度, 并且冻土强度会随着冻结温度的降低以及应变率的增加而增加。Zhang 等^[14]分析了冲击载荷下冻土的温度效应以及应变率效应, 并基于有效介质理论将细观裂纹参数与宏观波速联系起来, 建立了可以描述冻土冲击过程中损伤演化的表达式。Ma 等^[15]、Shangguan 等^[16]分别研究了初始微裂纹与微孔洞缺陷对冻土冲击动力学性能的影响。Tang 等^[17]基于 HJC 模型对冻土在单轴与围压情况下的冲击动力学行为进行了数值模拟。但以上研究主要集中在常规冻土方面, 对于冻融循环冻土的冲击动力学性能研究尚未见报道。

本文中将对冻土进行一系列不同应变率、温度以及冻融循环次数的冲击动态实验, 并基于冻土的应力-应变曲线和峰值应力特征分析其应变率效应、温度效应以及冻融循环效应。借鉴岩石定义冻融系数的方法, 将冻土峰值应力定义为冻融损伤因子, 量化冻融循环对冻土力学性质劣化的影响。同时, 基于 Weibull 分布推导描述冲击损伤演化的表达式, 并耦合改进的朱-王-唐(Z-W-T)黏弹性本构方程, 建立可以描述冻融循环冻土冲击动力学行为的损伤黏弹性本构模型。

1 实验与结果分析

1.1 实验方法

实验用土取自甘肃省陇南市某山区, 经捣碎、烘干、筛分、加水搅拌、模具定形后制成圆柱土体试样, 如图 1 所示。为减小惯性效应, 试样长径比取为 0.6, 尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$, 质量为 26.455 g, 含水率为 30%, 颗粒分布参考文献 [11]。为探究冻融循环对冻土冲击动态力学性能的影响, 使用圆柱土样预制冻结温度为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, 融化温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 循环次数为 0、1、3、5 次的冻融循环土样。然后将土样置入保温温度分别为 -20 、 -15 、 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰箱保温 12 h, 最后进行应变率分别为 350、450、550 s^{-1} 的冲击动态压缩实验, 实验方案见表 1。

使用 MIT-80L 高低温冻融循环试验机进行冻融循环实验。在冻融循环过程中, 材料的损伤主要是由水转变为冰的体积膨胀引起的, 当冻结温度接近 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 土样内的孔隙水并不会被大量冻结。因此, 为了得到较为可靠的冻融实验结果, 应设置较低的冻结温度。并且, 为了防止土体在融化过程中产生较大变形, 融化温度不宜过高 [18]。因此本文中设置冻结温度为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, 融化温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 冻结与融化过程的时间分别为 12 h。同时, 为使持续低温或持续高温对试样力学性能的影响最大化, 温度变化速率设置为高低温冻融循环试验机最大功率运行时的 $60 \text{ }^\circ\text{C/h}$ [19]。此外, 为了防止在冻融过程中土体吸收外界的水分或者挥发自身的水分, 并减小冻胀作用, 在冻融循环过程中采用封闭系统, 试样表面被均匀涂抹凡士林, 并使用保鲜膜包裹试样 [20]。冻融温度时程曲线以及 MIT-80L 高低温冻融循环试验机如图 2 所示。

采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 装置对冻土试样进行冲击动态压缩实验。SHPB 装置主要由 3 部分组成: 加载装置、杆组件以及数据采集记录系统 [21], 如图 3 所示。在冲击过程中, 子弹对入射杆的冲击使纵向压缩波在两个方向传递, 向右传递的压缩波形成入射波, 向左传递的压缩波在子弹的自由端完全释放并形成入射波的后沿, 因此入射波的持续时间取决于子弹的长度和纵波波速。当压缩波到达试样-入射杆端面时, 部分压缩波作为反射波被反射回入射杆内, 而其余压缩波会被透射进入试样, 由于试样与杆之间的阻抗失配, 波将在试样中来回反射, 并提高试样的应力水平。此外, 试样中传递到透射杆的压缩波形成透射波。使用应变片测量杆中的波信号, 即可得到冻土试样的波形图, 冻土典型波形图如图 4 所示。在实验中, 为了获得较长上升沿的入射波, 实现试样中的应力平衡、恒应变率变形以及消弱高频振荡, Zhang 等 [22] 基于双脉冲整形技术, 提出了一种利用脉冲整形器的结构响应进行脉冲整形的方法, 即将入射杆前端制成变截面圆锥状, 并在入射杆前端放置紫铜片作为脉冲整形器。

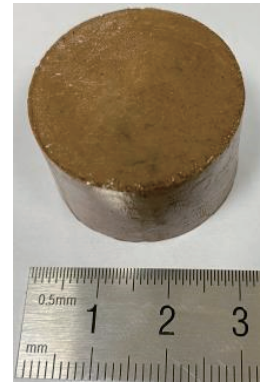


图 1 圆柱土体试样

Fig. 1 Cylindrical soil specimen

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

冻融循环次数	$T/^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$
0	-20	550, 450, 350
	-15	550
	-10	550
1	-20	550, 450, 350
	-15	550
	-10	550
3	-20	550, 450, 350
	-15	550
	-10	550
5	-20	550, 450, 350
	-15	550
	-10	550

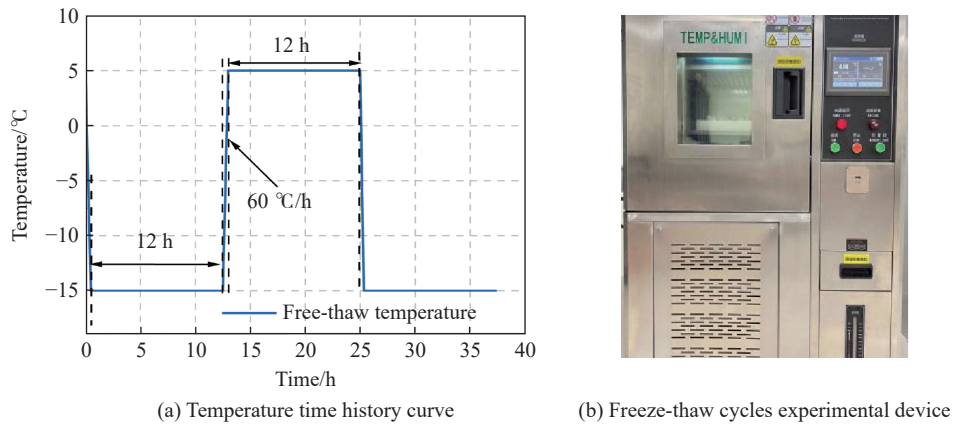


图 2 温度时程曲线与冻融循环实验装置
Fig. 2 Temperature time history curve and freeze-thaw cycles experimental device

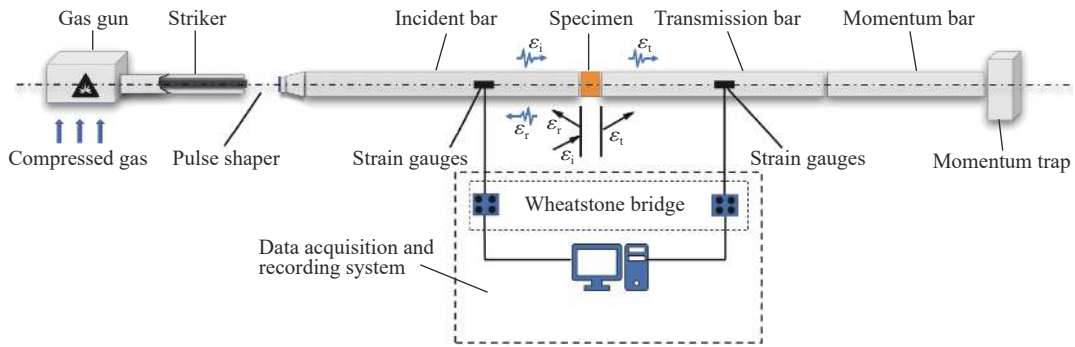


图 3 SHPB 实验装置
Fig. 3 A SHPB device

使用二波法处理实验数据。二波法是在质量和动量守恒的基础上, 由一维波传播假设和应力平衡假设推导得到的, 二波法可以表示为^[23]:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = -2 \frac{c_b}{L_s} \varepsilon_r \\ \varepsilon = -2 \frac{c_b}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \\ \sigma = \frac{A_b}{A_s} E_b \varepsilon_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_b 为弹性杆波速, L_s 为试样长度, A_b 与 A_s 分别为杆与试样的横截面积, E_b 为杆的弹性模量, ε_r 、 ε_t 为反射波和透射波, ε 与 σ 为试样的应变和应力, $\dot{\varepsilon}$ 为试样的应变率。

1.2 实验结果分析

不同冻融循环次数、保温温度和应变率下冻土的力学特征参数见表 2, 表中 T 为保温温度, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, σ_p 为峰值应力, ε_p 为最终应变。

从表 2 可知, 冻融循环冻土存在明显的应变率效应、温度效应和冻融循环效应, 下面结合应力-应变曲线分析 3 种效应的作用机理及表现形式。

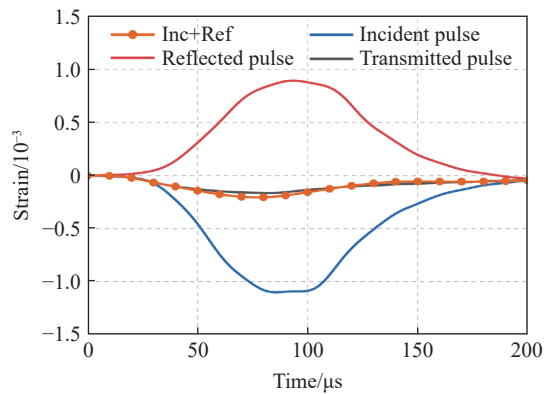


图 4 典型波形图
Fig. 4 Typical waveform

表 2 冻融循环冻土冲击实验结果

Table 2 Experimental results of frozen soil with freeze-thaw cycles under impact loading

冻融循环次数	$T/^\circ\text{C}$	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	实验1		实验2		实验3	
			σ_p/MPa	$\varepsilon_p/\%$	σ_p/MPa	$\varepsilon_p/\%$	σ_p/MPa	$\varepsilon_p/\%$
0	-10	550	6.74	4.07	7.16	4.13	6.96	4.11
	-15	550	8.71	4.21	8.42	4.14	8.53	3.91
		350	8.55	2.34	8.29	2.54	8.19	2.45
	-20	450	9.67	3.36	9.78	3.25	10.11	3.68
		550	11.13	4.34	11.06	4.18	10.69	4.29
1	-10	550	6.22	4.16	5.91	4.31	6.42	4.20
	-15	550	7.75	3.96	7.55	3.91	7.82	4.12
		350	7.48	2.39	7.64	2.58	7.51	2.44
	-20	450	8.37	3.43	8.64	3.15	8.74	3.25
		550	9.61	4.10	9.51	4.13	9.81	4.07
3	-10	550	5.96	4.13	6.40	4.15	6.41	4.26
	-15	550	7.41	4.19	7.95	4.24	7.11	4.11
		350	6.72	2.74	7.03	2.51	7.11	2.82
	-20	450	8.97	3.41	8.54	3.38	8.62	3.45
		550	9.31	4.23	9.54	4.11	9.31	4.08
5	-10	550	6.15	4.32	6.32	4.23	5.92	4.22
	-15	550	7.42	4.28	7.12	4.18	7.71	4.13
		350	7.11	2.28	7.02	2.21	7.21	2.34
	-20	450	8.54	3.08	8.61	3.03	8.54	2.94
		550	9.62	4.13	9.36	4.11	9.51	3.92

1.2.1 应变率效应

脆性材料在较高应变率的冲击载荷下常常表现出更高的动态临界承载能力(峰值应力),即脆性材料的应变率效应^[24]。图 5 为温度为 -20°C ,不同应变率(350 、 450 、 550 s^{-1})和不同冻融循环次数(0、1、3、5 次)下冻土的应力-应变曲线。

从图 5 中可以看出,随着应变率的增高,冻融循环冻土的峰值应力增大,表现出明显的应变率效应。并且,材料的峰值应变也会随着应变率的增高而增高。一般的应变率敏感材料,在冲击载荷下,会表现出随应变率增高峰值应力增大而峰值应变减小的现象,即所谓的“动脆”现象。而冻土材料由于其内部存在着大量的微裂纹和微孔洞等初始缺陷,在冲击载荷的作用下,其最终破坏是应变率硬化和损伤软化(微缺陷增生)共同作用的结果^[25]。在加载的初始阶段,冻土内部的微缺陷还未得到扩张和增生,对冻土材料造成的影响较小,此时应变率硬化起主导作用,应力水平随应变的增加急速攀升,应力-应变曲线接近线性。但随着应变与应力水平的增高,冻土材料内微裂纹和微孔洞开始扩张并增生,冲击过程中冻土吸收的能量逐渐增加,并大量用于微缺陷的扩展,导致冻土材料的韧性增加,应力-应变曲线成为上凸的非线性曲线。与低应变率的冲击加载相比,在高应变率的冲击载荷下,加载的初始阶段,冻土内部产生的微缺陷数量更多,导致高应变率加载下冻土的韧性更高。同时,由于变形速度的增加,裂纹的扩展来不及沿材料最薄弱的界面贯通,而在各自的区域直接进行,因此材料的峰值应力与应变更高。

1.2.2 温度效应

岩石、土壤以及混凝土等岩土类材料在低温冻结时,除了材料本身会变脆,温度的变化也会导致材料内部孔隙水含量与状态发生改变,从而影响其基本物理性质、外貌形态以及力学性能。因此,探究材

料在不同温度下的力学性能至关重要。图 6 为应变率为 550 s^{-1} , 不同温度 (-20 、 -15 、 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 以及不同冻融循环次数 (0、1、3、5 次) 下冻土的应力-应变曲线。

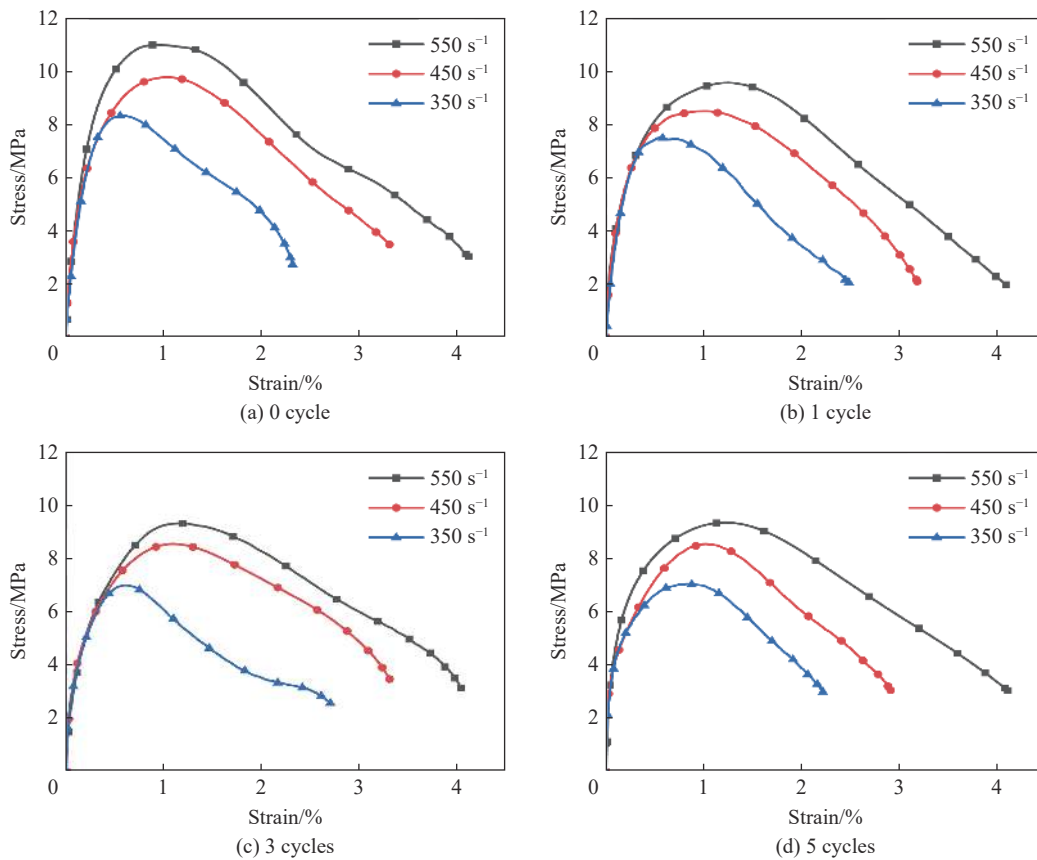


图 5 不同工况下冻土的应力-应变曲线图 ($T = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Stress-strain curves of frozen soil for different cases ($T = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

由图 6 可知, 随着温度的降低, 冻融循环冻土的动弹性模量与峰值应力逐渐增大, 表现出温度效应。冻土是由土颗粒、冰颗粒、未冻水以及气体组成的非均质四相复合材料, 随着温度的降低, 冻土中未冻水的含量降低, 冰颗粒的含量增加^[26]。由于冰的弹性模量远大于土的, 当冻土内的冰颗粒含量增加时, 冻土的强度显著增大。同时, 随着冻结温度的降低, 土壤的基质吸力与冰颗粒的弹性模量会逐渐增大, 这使得冻土材料的强度进一步增大。因此, 冻土表现出明显的温度效应。从图 6 中还可以发现, 应变率一致性使冻土表现出应变汇聚的现象, 这表明在高应变率的冲击载荷下冻土的动脆性占主导地位^[27]。

1.2.3 冻融循环效应

冻融循环是一种温度与水分相互耦合的强风化间接作用, 会使材料内部微缺陷增生扩展, 对材料的微结构造成损伤, 从而影响材料的宏观力学性能^[28]。岩石、混凝土等岩土类材料在经过冻融循环后, 其力学性能会发生一定程度的劣化^[29-30]。冻土在不同温度 (-20 、 -15 、 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、不同应变率 (350 、 450 、 550 s^{-1}) 以及不同冻融循环次数 (0、1、3、5 次) 条件下的峰值应力如图 7 所示。

从图 7 中可以发现, 冻融循环冻土的峰值应力明显低于常规冻土。可见冻融循环弱化了冻土试样抵抗变形的能力, 使其力学性能退化^[31]。当环境温度低于零摄氏度时, 冻土试样内部的孔隙水会被冻结成冰, 体积也会随之增大, 已有研究表明水转化成冰的最大体积膨胀率为 9% ^[32]。围绕冰的体积膨胀, 在冻结过程中, 冻土内部会产生 3 种不同的压力^[33]。首先, 随着冰晶体的生成以及扩张, 冰晶体会自发产生结晶压力, 使孔隙变形并破坏固有孔隙形态。同时, 试样内部的孔隙水被膨胀的冰晶挤压, 使试样孔隙内部产生孔隙水压力, 当这个压力高到足以使周围的凝胶体变形超过其弹性极限时, 将导致试样内部

产生不可恢复的永久性损伤。最后, 由于试样内冰结晶的速度以及位置存在差异, 试样内部会因此产生压力差, 在这个压力差的作用下, 试样内部的未冻结水会时刻向冻结区迁移, 在试样内存在的迁移压力以及不停迁移的孔隙水也会使试样孔隙产生损伤^[34]。试样冻结过程中的 3 种压力示意图如图 8 所示。在冻融循环过程中, 土体试样由于 3 种压力的存在导致其内部产生了累计损伤。相较于未经历冻融循环的土体试样, 当将被冻融循环的土体试样置入保温箱进行保温时, 其已存在一个确定的初始损伤, 因此, 经历冻融循环的冻土所能承受的载荷应力水平明显降低。

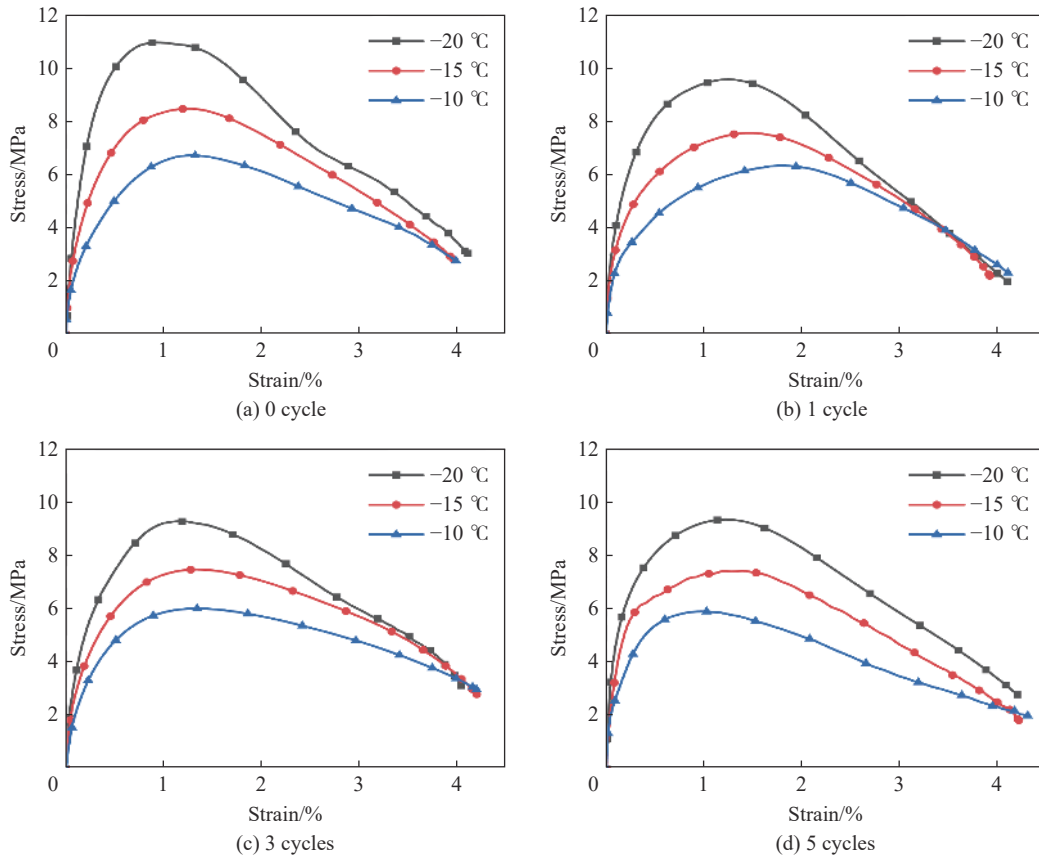


图 6 不同工况下冻土的应力-应变曲线图 ($\dot{\epsilon}=550 \text{ s}^{-1}$)

Fig. 6 Stress-strain curves of frozen soil for different cases ($\dot{\epsilon}=550 \text{ s}^{-1}$)

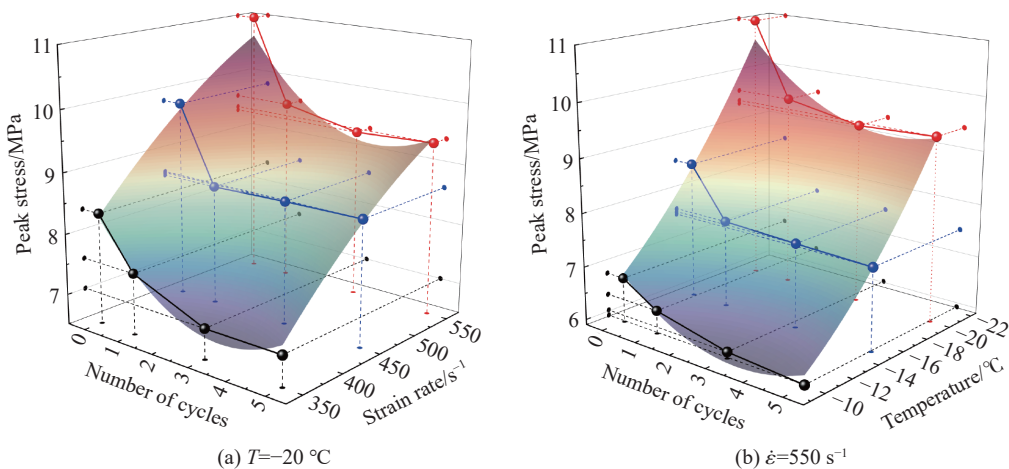


图 7 不同工况下冻土的冻土峰值应力

Fig. 7 Peak stress of frozen soil for different cases

同时,可以发现,在经历 3~5 次冻融循环后,冻土材料的峰值应力将不再改变,达到一个稳定状态。冻融循环过程中,冻土材料的微裂纹与微孔洞反复膨胀和塌陷,导致材料孔隙率的增大和损伤的累积,微结构特征的不断改变也使材料的宏观力学性能不断变化。但经历数次冻融循环后,材料内部的孔隙率与累积损伤已达到一个恒定值,相同条件的冻融循环过程已很难引起影响较大的材料微结构改变。因此,在外界冻融循环的时间与温度不变的情况下,冻土材料将维持稳定状态。可见,材料在冻融循环作用下可由一个稳定状态向另一个稳定状态发展,体系从有序到无序,再到有序,符合热力学定律。

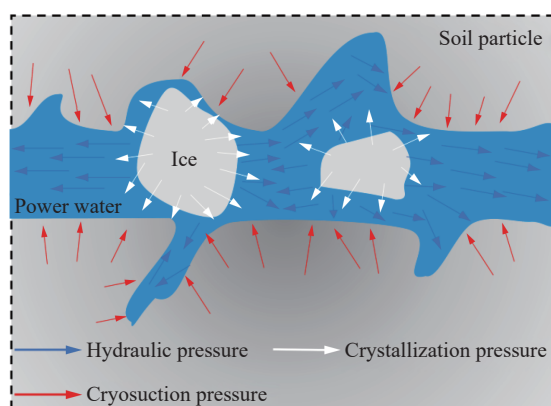


图 8 冻结过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the freezing process

2 本构模型

在载荷的作用下,损伤在材料内部不断累积,直至材料断裂或破坏。有效应力的概念已被证明是量化损伤对材料影响的有效方法,有效应力可以表示为:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \tag{2}$$

式中: $\tilde{\sigma}$ 为材料损伤后的有效应力, D 为损伤变量, σ 为名义应力。

冻融循环与冲击载荷都会使冻土内部产生损伤。冻融循环作用的本质是冻土微结构的改变与颗粒的重新排列,冲击载荷的内涵是冻土颗粒的位移及破坏,由两者诱发的冻融损伤与冲击损伤相互耦合、相互影响,必将造成冻土力学特性的改变。为了区分两者对冻土动态力学特性的影响,引入冻融损伤因子 f , 式(2)被修改为:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{f(1-D)} \tag{3}$$

2.1 冻融损伤因子

冻融循环作为寒冷地区的典型环境载荷,是由多孔材料内部孔隙水周期性相变引起的。冻融循环会导致冻土材料内部微孔洞与微裂纹的增生和扩张,使其抵抗破坏的能力降低^[35],并最终造成其宏观力学性能的劣化。通过上述冻融循环效应分析,可以发现,随着冻融循环次数的变化,冻土材料的峰值应力会产生相应的改变。宏观力学性能的反应能够反映材料内部微观结构的劣化程度,峰值应力作为材料强度的具体外现,常被用来反映材料的力学特性,因此本文中借鉴岩石定义冻融系数的方法^[36],使用峰值应力定义冻土材料的冻融损伤因子,其表达式为:

$$f = \frac{\sigma_f}{\sigma_s} \tag{4}$$

式中: σ_s 、 σ_f 为冻融前后冻土的峰值应力。

冻融循环对冻土的劣化在冲击加载前已经确定,并不会因为加载方式的不同而改变,因此冻融损伤因子应仅与温度和冻融循环次数有关,与应变率无关。依据不同温度和不同冻融循环次数的实验数据,通过式(4)计算,即可得到冻融损伤因子的具体值,如图 9 所示。

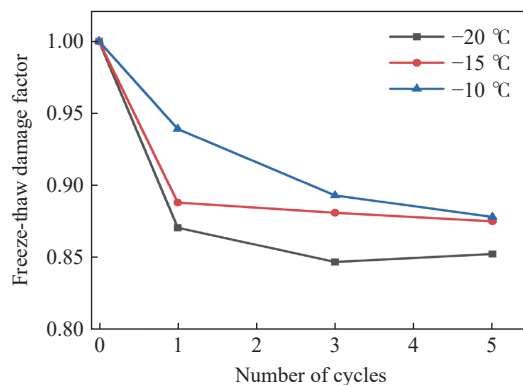


图 9 冻融损伤因子

Fig. 9 Freeze-thaw damage factors

冻土材料由于微结构的改变导致其力学性质发生劣化。通过图 9, 可以发现, 随着冻融循环次数的增加, 冻融损伤因子明显减小。但在经历一定的冻融循环次数后, 由于冻土材料达到了新的稳定平衡, 内部微裂纹与微孔洞不再增生扩展, 此时冻融损伤因子将不再改变, 趋于稳定。

2.2 冲击损伤

在载荷的作用下, 材料微结构会发生变化, 引起微缺陷成胚、孕育、扩展和汇合, 最终导致宏观裂纹形成或材料破坏。在冻土的冲击动态实验过程中, 试样的破坏主要是由大量微缺陷的增生与扩张导致的。为了便于分析, 将冻土的损伤考虑成一个连续的过程, 并将冻土材料考虑为由无数足够小并含缺陷的微元体组成, 假设微元体强度为 K , 并符合 Weibull 统计分布规律。则微元体强度的概率密度函数可以表示为:

$$\varphi(K) = \frac{m}{F} \left(\frac{K}{F}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{K}{F}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中: F 、 m 为 Weibull 分布参数。由于微元体破坏的随机性, 用冻土微元破坏概率作为其损伤变量, 可得:

$$D = \int_0^K \varphi(x) dx = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K}{F}\right)^m\right] \quad (6)$$

式(6)即为冻土在冲击载荷下的损伤表达式, 假设冻土微元体的破坏服从 Drucker-Prager 准则^[37-38], 则 K 可以表示为:

$$K = \delta I_1 + J_2^{1/2} \quad (7)$$

式中: δ 为与冻土内与摩擦角有关的参数, I_1 、 J_2 分别为应力张量第一不变量、应力偏张量的第二不变量, 其表达式分别为:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \end{cases} \quad (8)$$

在单轴冲击条件下, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 。因此可得 K 的表达式:

$$K = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \delta\right) \sigma \quad (9)$$

式中: σ 为微元体在一维条件下的主应力。假设微元体的变形满足广义胡克定律。则主应力为:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (10)$$

式中: E 、 ε 分别为微元体的弹性模量、应变。通过整理以上式子, 材料的损伤变量可以表示为:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1 + \sqrt{3}\delta}{\sqrt{3}F} E\varepsilon\right)^m\right] \quad (11)$$

假设冻土在冲击载荷下的变形行为满足广义胡克定律, 则冲击载荷下冻土的损伤本构关系为:

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon = E\varepsilon \exp\left[-\left(\frac{1 + \sqrt{3}\delta}{\sqrt{3}F} E\varepsilon\right)^m\right] \quad (12)$$

通过观察冻土的应力-应变曲线特征, 可以发现冻土的应力-应变曲线首先呈线性上升, 在达到峰值应力后应力水平逐渐下降。因此, 在应力-应变曲线中存在一个应力峰值点, 假设应力-应变曲线在应变达到 ε_f 时, 应力达到峰值, 因此有边界条件:

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_f} = E \exp\left[-\left(\frac{1 + \sqrt{3}\delta}{\sqrt{3}F} E\varepsilon_f\right)^m\right] \left[1 - m \left(\frac{1 + \sqrt{3}\delta}{\sqrt{3}F} E\varepsilon_f\right)^{m-1}\right] = 0 \quad (13)$$

求解式(13), 可得:

$$F = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \delta\right) E\varepsilon_f^{1/m} \quad (14)$$

因此, 满足双参数 Weibull 分布的冲击损伤为:

$$D = 1 - \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^m \right] \quad (15)$$

2.3 黏弹性本构模型

作为材料静态理论的自然拓展, 研究者常假设材料的动态力学行为是与应变率相关的, 并结合实验与多种瞬时破坏理论建立了动态力学行为与应变率之间的关系。朱兆祥等对各种典型工程材料进行了大量研究, 并依据 Green-Revlin 多重积分方程提出了一个可以表示高聚物动态力学行为的非线性黏弹性本构方程, 即 Z-W-T 方程^[39]。该模型可以很好地描述材料在高应变率下的力学响应。如图 10 所示, 该模型由一个非线性弹性体、一个低频 Maxwell 体和一个高频 Maxwell 体组成:

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left(-\frac{t-\tau}{\theta_1} \right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left(-\frac{t-\tau}{\theta_2} \right) d\tau \quad (16)$$

式中: E_0 、 α 和 β 为描述非线性弹性平衡响应时的弹性常数; 第 1 个积分项描述低应变率下的黏弹性响应, E_1 、 θ_1 分别为所对应的低频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间; 第 2 个积分项描述高应变率下的黏弹性响应, E_2 、 θ_2 分别为所对应的高频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。

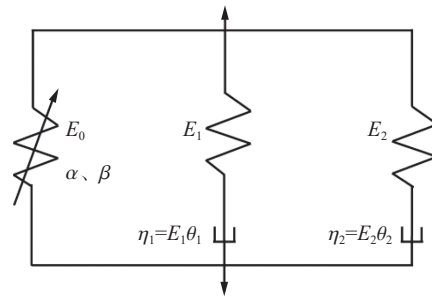


图 10 Z-W-T 本构模型

Fig. 10 Z-W-T constitutive model

冻土作为一种多相复合材料, 在冲击载荷作用下表现出明显的应变率效应^[40]。同时, 由于冻土在冲击载荷下的应变滞后性, 可以假设冻土在冲击加载下的变形为黏弹性变形, 使用 Z-W-T 模型来描述冻土的冲击动态力学行为。由于在准静态实验中, 冻土的应力-应变曲线几乎是线性的^[14], 因此可将 Z-W-T 模型中的非线性项简化为线性项。同时, 大量实验表明, θ_1 通常为 $10 \sim 10^2$ 量级, θ_2 通常为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 量级, 两者相差约 6 个量级, 它们分别对低应变率和高应变率响应负责, 互不相关^[41]。对冻土材料的高应变率冲击加载时间尺度 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 来说, 低频 Maxwell 体没有足够的时间来松弛, 将退化为一个简单的弹簧。并且由于冻土材料 E_1 的量级很小, 它对冻土冲击动态力学行为产生的影响也很微弱。因此 Z-W-T 模型中的第 1 个积分项可以忽略。改进的 Z-W-T 本构方程可以表示为:

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp \left(-\frac{t-\tau}{\theta_2} \right) d\tau \quad (17)$$

在恒应变率加载下, 式(17)可以修改为:

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp \left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2 \dot{\varepsilon}} \right) \right] \quad (18)$$

引入冲击损伤和冻融损伤因子, 则冻融循环冻土的损伤黏弹性本构模型可以表示为:

$$\sigma = f \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^m \right] \left\{ E_0 \varepsilon + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp \left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2 \dot{\varepsilon}} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

3 本构模型验证

本文中建立的损伤黏弹性本构模型一共包含 6 个参数: 冻融损伤因子 f 、冲击损伤的材料参数 m 、

峰值应力对应的峰值应变 ε_f 、Z-W-T 本构模型的弹性常数 E_0 、弹性常数 E_2 以及 θ_2 。其中, f 通过峰值应力得到, ε_f 通过实验应力-应变曲线得到, E_0 、 E_2 、 θ_2 、 m 通过最小二乘法拟合得到。通过实验和拟合可确定参数的具体值, 见表 3~4。

表 3 本构模型参数 ($T = -20^\circ\text{C}$)Table 3 Constitutive model parameters ($T = -20^\circ\text{C}$)

冻融循环次数	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	E_0/GPa	E_2/GPa	$\theta_2/\mu\text{s}$	ε_f	m	f
0	550	1.636	11.23	0.705	0.0131	1.16	1.000
	450	1.667	7.36	0.971	0.0116	1.23	1.000
	350	1.606	4.19	2.863	0.0088	1.23	1.000
1	550	1.655	9.16	0.671	0.0129	1.33	0.871
	450	1.560	8.63	0.919	0.0114	1.32	0.871
	350	1.624	4.45	2.721	0.0086	1.33	0.871
3	550	1.732	10.23	0.513	0.0139	1.13	0.847
	450	1.630	13.21	0.541	0.0122	1.21	0.847
	350	1.652	13.52	0.779	0.0091	1.11	0.847
5	550	1.648	14.51	0.542	0.0137	1.14	0.852
	450	1.625	11.01	0.467	0.0119	1.07	0.852
	350	1.626	14.06	0.467	0.0091	1.17	0.852

表 4 本构模型参数 ($\dot{\varepsilon} = 550 \text{ s}^{-1}$)Table 4 Constitutive model parameters ($\dot{\varepsilon} = 550 \text{ s}^{-1}$)

冻融循环次数	$T/^\circ\text{C}$	E_0/GPa	E_2/GPa	$\theta_2/\mu\text{s}$	ε_f	m	f
0	-20	1.636	11.23	0.705	0.0131	1.16	1.000
	-15	1.522	7.25	0.577	0.0134	1.03	1.000
	-10	1.340	13.22	0.127	0.0131	1.02	1.000
1	-20	1.655	9.16	0.671	0.0129	1.34	0.871
	-15	1.531	16.12	0.209	0.0129	1.12	0.888
	-10	1.335	9.01	0.151	0.0131	1.05	0.939
3	-20	1.732	10.23	0.512	0.0139	1.13	0.847
	-15	1.541	10.39	0.257	0.0134	1.14	0.881
	-10	1.381	4.07	0.397	0.0134	1.02	0.893
5	-20	1.648	14.50	0.542	0.0137	1.14	0.852
	-15	1.455	8.86	0.623	0.0134	1.01	0.875
	-10	1.153	10.83	0.411	0.0131	1.06	0.878

分析表 3~4 可以发现, 随着温度的降低, 弹性常数 E_0 增大。冰颗粒的含量与弹性模量随着温度的降低而增大, 致使冻土的弹性模量增大。因此, 拟合的弹性常数 E_0 反映了冻土的弹性模量这一材料基本性质。此外, 冻融循环后, 冻土强度的劣化由冻融损伤因子表征, 因此, 弹性常数 E_0 的数值并不会因冻融循环次数的改变而发生较大变化。确定所有参数的取值后, 代入本文建立的损伤黏弹性本构方程, 即可获得理论计算的应力-应变曲线。理论曲线与实验曲线如图 11~12 所示。

通过对比理论计算和实验所得的应力-应变曲线, 可以发现, 理论曲线与实验曲线具有良好的一致性。该模型可以较好地揭示冻土的应变率效应、温度效应、冻融循环效应以及三者耦合表现出的复杂动态力学性能。因此, 本文所建立的损伤黏弹性本构模型符合冻融循环冻土冲击动态实验现象及其基本规律, 验证了该模型的合理性与有效性。

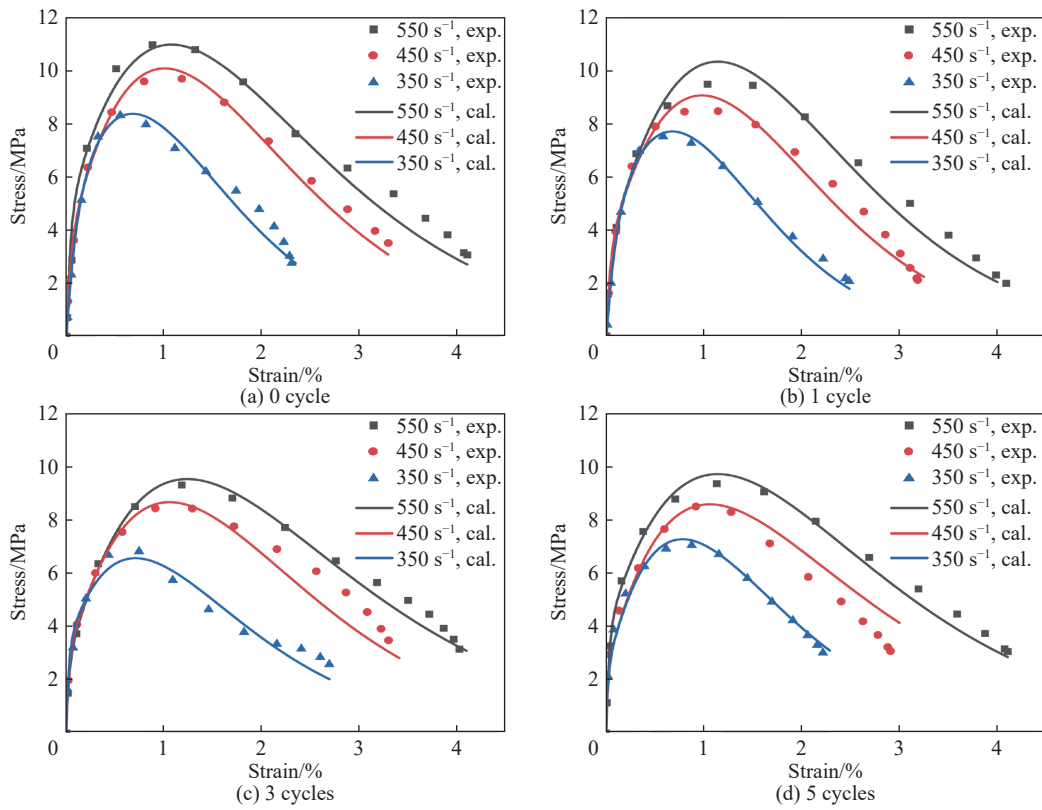


图 11 相同温度不同应变率下冻土的理论曲线与实验曲线 ($T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 11 Theoretical and experimental curves of frozen soil at the same temperature and different strain rates ($T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

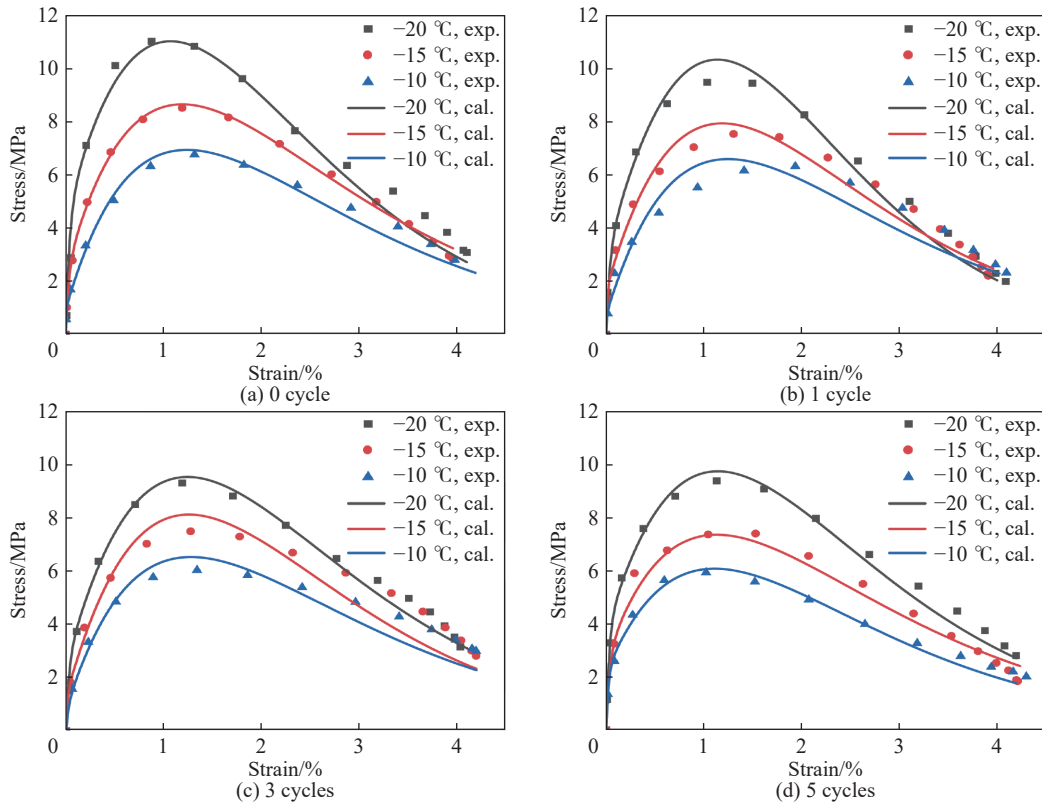


图 12 相同应变率不同温度下冻土的理论曲线与实验曲线 ($\dot{\epsilon} = 550\text{ s}^{-1}$)

Fig. 12 Theoretical and experimental curves of at the same strain rate and different temperatures ($\dot{\epsilon} = 550\text{ s}^{-1}$)

4 结 论

对冻土进行了不同应变率、温度以及循环次数的冲击动态实验,发现了冻融循环对冻土材料力学性质的劣化影响,并通过静水压力等理论对其劣化机理做出了解释。将反映材料抵抗破坏能力的峰值应力定义为冻融损伤因子,并结合推导的满足双参数 Weibull 分布的冲击损伤,建立了可以描述冻融循环冻土冲击动态力学行为的损伤黏弹性本构模型,主要结论如下。

(1) 冻土的峰值应力随着冻融循环次数的增加而降低,表现出明显的冻融循环效应,冻融循环通过改变冻土的微结构特征从而劣化其力学性能。但冻融循环效应存在临界循环次数,当达到这一临界次数后,冻土的峰值应力将维持稳定。此外,冻土存在温度效应与应变率效应,其峰值应力随应变率的增加或者温度的降低而增加。

(2) 材料的损伤状态在一定程度上可以由材料抵抗破坏的能力来表征,峰值应力作为冲击过程中冻土抵抗破坏的量化值,由它定义的冻融损伤因子可以较好地描述冻融循环对冻土材料劣化的影响。并且基于胡克定律和 Weibull 分布推导的冲击损伤表达式可以较好地表征冻土在冲击过程中的损伤演化过程。

(3) Z-W-T 模型的低频 Maxwell 体在冻土的高应变率冲击过程中来不及响应,将失去它的作用并不再影响冻土的冲击动态力学行为。基于此改进的 Z-W-T 模型,可以较好地描述冻土的冲击动态力学行为。结合建立的冻融损伤因子,冻融循环冻土在冲击载荷下的动态力学性能也可以被较好地表征。

参考文献:

- [1] FRENCH H M. The periglacial environment [M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [2] RAN Y H, LI X, CHENG G D, et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, 23(4): 322–333. DOI: 10.1002/ppp.1756.
- [3] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(2): 158–160. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1999.02.005.
MA W, XU X Z, ZHANG L X. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(2): 158–160. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1999.02.005.
- [4] LEE W, BOHRA N C, ALTSCHAEFFL A G, et al. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 559–568. DOI: 10.1139/t95-059.
- [5] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(23): 4313–4319. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.23.018.
WANG D Y, MA W, CHANG X X, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4313–4319. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.23.018.
- [6] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 119: 151–157. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.008.
- [7] 苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S1): 2990–2994.
SU Q, TANG D J, LIU S. Test on physico-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 2990–2994.
- [8] 穆彦虎, 陈涛, 陈国良, 等. 冻融循环对黏质粗粒土抗剪强度影响的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(3): 375–386. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2019.03.002.
MU Y H, CHEN T, CHEN G L, et al. Experimental study on effect of cyclic freeze-thaw on shear behaviors of clayey coarse-grained soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3): 375–386. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2019.03.002.
- [9] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 887–894. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.08.010.

- QI J L, CHENG G D, VERMEER P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 887–894. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.08.010.
- [10] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 146: 9–18. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.11.011.
- [11] XU X T, ZHANG W D, FAN C X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22(4): 925–941. DOI: 10.1080/14680629.2019.1696221.
- [12] FAN C X, ZHANG W D, LAI Y, et al. Mechanical behaviors of frozen clay under dynamic cyclic loadings with freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 181: 103184. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103184.
- [13] LEE M Y, FOSSUM A F, COSTIN L S, et al. Frozen soil material testing and constitutive modeling [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2002. DOI: 10.2172/793403.
- [14] ZHANG F L, ZHU Z W, FU T T, et al. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading [J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 140: 103217. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103217.
- [15] MA D D, XIANG H S, MA Q Y, et al. Dynamic damage constitutive model of frozen silty soil with prefabricated crack under uniaxial load [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 147(6): 04021033. DOI: 10.1061/(Asce)Em.1943-7889.0001933.
- [16] SHANGGUAN Z H, ZHU Z W, TANG W R. Dynamic impact experiment and numerical simulation of frozen soil with prefabricated holes [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(8): 04020085. DOI: 10.1061/(Asce)Em.1943-7889.0001821.
- [17] TANG W R, ZHU Z W, FU T T, et al. Dynamic experiment and numerical simulation of frozen soil under confining pressure [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36(6): 1302–1318. DOI: 10.1007/s10409-020-00999-4.
- [18] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48(1): 34–43. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.09.008.
- [19] XU J, LI Y F, LAN W, et al. Shear strength and damage mechanism of saline intact loess after freeze-thaw cycling [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 164: 102779. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.05.005.
- [20] JI Y K, ZHOU G Q, HALL M R. Frost heave and frost heaving-induced pressure under various restraints and thermal gradients during the coupled thermal-hydro processes in freezing soil [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(5): 3671–3683. DOI: 10.1007/s10064-018-1345-z.
- [21] XIA K W, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system—a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1): 27–59. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.07.008.
- [22] ZHANG F L, ZHU Z W, MA W, et al. A unified viscoplastic model and strain rate-temperature equivalence of frozen soil under impact loading [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 152: 104413. DOI: 10.1016/j.jmps.2021.104413.
- [23] LEE S, KIM K M, PARK J, et al. Pure rate effect on the concrete compressive strength in the split Hopkinson pressure bar test [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 191–202. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.015.
- [24] 董凯, 任辉启, 阮文俊, 等. 珊瑚砂应变率效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(9): 093102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0432.
- DONG K, REN H Q, RUAN W J, et al. Study on strain rate effect of coral sand [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 093102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0432.
- [25] 巫绪涛, 胡时胜, 陈德兴, 等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(2): 125–131. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)02-0125-07.
- WU X T, HU S S, CHEN D X, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(2): 125–131. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)02-0125-07.
- [26] ZHU Z W, KANG G Z, MA Y, et al. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading [J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 102: 108–116. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.08.009.
- [27] 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. DOI: 10.6052/0459-1879-2005-6-2004-450.
- CHEN B S, HU S S, MA Q Y, et al. Experimental research of dynamic mechanical behaviors of frozen soil [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(6): 724–728. DOI: 10.6052/0459-1879-2005-6-2004-450.
- [28] LI B, ZHU Z W, NING J G, et al. Viscoelastic-plastic constitutive model with damage of frozen soil under impact loading and

- freeze-thaw loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 214: 106890. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106890.
- [29] 姜亚成, 周磊, 朱哲明, 等. 冻融循环对含纯 I 型裂隙围岩的动态起裂特性影响规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 043104. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0330.
- JIANG Y C, ZHOU L, ZHU Z M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on dynamic fracture initiation characteristics of surrounding rock with pure I type fracture under impact loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 043104. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0330.
- [30] JIN S S, ZHENG G P, YU J. A micro freeze-thaw damage model of concrete with fractal dimension [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119434.
- [31] ZHANG Z Y, LIU Q, WU Q, et al. Damage evolution of asphalt mixture under freeze-thaw cyclic loading from a mechanical perspective [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105923. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105923.
- [32] ZENG W, DING Y N, ZHANG Y L, et al. Effect of steel fiber on the crack permeability evolution and crack surface topography of concrete subjected to freeze-thaw damage [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 138: 106230. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106230.
- [33] GONG F Y, JACOBSEN S. Modeling of water transport in highly saturated concrete with wet surface during freeze/thaw [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 115: 294–307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.013.
- [34] SUN M, ZOU C Y, XIN D B. Pore structure evolution mechanism of cement mortar containing diatomite subjected to freeze-thaw cycles by multifractal analysis [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103731. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103731.
- [35] LÖVQVIST L, BALIEU R, KRINGOS N. A thermodynamics-based model for freeze-thaw damage in asphalt mixtures [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 203: 264–275. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.07.021.
- [36] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3076–3082. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.012.
- XU G M, LIU Q S. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3076–3082. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.012.
- [37] FU T T, ZHU Z W, CAO C X. Constitutive model of frozen-soil dynamic characteristics under impact loading [J]. *Acta Mechanica*, 2019, 230(5): 1869–1889. DOI: 10.1007/s00707-019-2369-6.
- [38] CHOI K S, PAN J. A generalized anisotropic hardening rule based on the Mroz multi-yield-surface model for pressure insensitive and sensitive materials [J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(7): 1325–1358. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.09.005.
- [39] WANG L L. Stress wave propagation for nonlinear viscoelastic polymeric materials at high strain rates [J]. *Chinese Journal of Mechanics-Series A*, 2003, 19(1): 177–183. DOI: 10.1017/s1727719100004184.
- [40] ZHU Z W, FU T T, ZHOU Z W, et al. Research on Ottosen constitutive model of frozen soil under impact load [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 137: 104544. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104544.
- [41] 王礼立. 爆炸/冲击动力学学习研究中的若干疑惑 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(1): 011401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0415.
- WANG L L. Some doubts in studying explosion/impact dynamics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(1): 011401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0415.

(责任编辑 曾月蓉)