

# 冻结重塑黏土损伤特性及影响因素分析

吴旭平, 丁春林\*

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 基于连续损伤力学理论及冻土横观各向同性损伤变量的计算方法, 利用冻土常规三轴剪切试验, 系统分析了不同温度、含水率和围压条件下冻结重塑黏土的损伤特性。研究结果表明: ①不同试验条件下冻结重塑黏土损伤演化曲线规律一致, 前期增长比较快速, 后期变化相对平缓, 且最大轴向损伤变量  $D_{1\max}$  一般介于 0.6~0.8 之间; ②温度对冻结重塑黏土损伤特性影响较明显, 降低温度可以明显强化冻土结构, 减少冻土结构的损伤及延缓冻土损伤的发展, 而含水率和围压对其影响不明显; ③割线模量可以较好地表征冻土在加载过程中裂隙的发展特点和结构的损伤演化规律, 损伤初始点轴向应变和割线模量与温度之间存在较好的线性增长关系, 且冻结重塑黏土损伤应变门槛值  $\varepsilon_0$  一般介于 0.3%~0.7%, 对应的割线模量一般介于 200~550 MPa。

**关键词:** 冻结重塑黏土; 三轴剪切试验; 损伤特性; 影响因素

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)11-2038-07

作者简介: 吴旭平(1988-), 男, 浙江淳安人, 硕士研究生, 主要研究方向为地下工程、岩土工程等方面。E-mail: xupingwu@gmail.com。

## Damage properties and influence factors of remolded frozen clay

WU Xu-ping, DING Chun-lin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the theories of the continuum damage mechanics and the methods for transversely isotropic damage variables, the damage properties of remolded frozen clay are systematically analyzed under different temperatures, moisture contents and confining pressures by using the conventional triaxial shear tests. The research results show that: (1) the damage evolution behaviors of the remolded frozen clay under different test conditions are consistent, that is, the early stage has rapid growth and the later stage has gentle change and the maximum interaxial damage variable  $D_{1\max}$  generally ranges from 0.6 to 0.8; (2) the freezing temperature has obvious effect on the damage properties of the remolded frozen clay, and lowering the temperature may strengthen the structure obviously so as to reduce its structural damage and to delay its damage evolution; and (3) the secant modulus can well represent the development characteristics of cracks and the damage evolution behaviors of the remolded frozen clay during the loading procedure, and the relationship between the axial strain and the secant modulus of the damage threshold and temperature rises linearly, the damage strain threshold  $\varepsilon_0$  generally ranges from 0.3% to 0.7% and the corresponding secant moduli generally range from 200 MPa to 550 MPa.

**Key words:** remolded frozen clay; triaxial shear test; damage property; influence factor

## 0 引言

冻土的变形过程就是其微观结构损伤的不可逆过程, 在外荷载作用下, 冻土的既有微裂纹及颗粒表现出明显的定向排列趋势, 且随着荷载的增加, 新的微裂纹就会萌生, 微裂纹将进一步发育和扩展成宏观裂纹, 并最终导致冻土材料的破坏<sup>[1-2]</sup>。将连续损伤力学应用于冻土工程, 可以有效地表征损伤对冻土宏观力学性质的影响以及冻土结构损伤的演化过程与规律<sup>[3-4]</sup>, 而如何确定损伤变量是运用损伤力学理论研究冻土损伤演化方程和本构关系的基础与关键<sup>[5-6]</sup>。

目前国内外学者主要通过结构分析法和性能测试法进行冻土加载过程中的受损检测, 进而分析冻土结构的细微观损伤特性。维亚洛夫等<sup>[7]</sup>首先将微结构损伤概念引入到冻土力学中, 并利用光学显微镜和切片法对冻土蠕变过程中微结构的变化进行观察和分析; 何平<sup>[8]</sup>依据连续介质力学和热力学原理, 建立了冻土黏弹性损伤耦合本构理论, 并提出损伤演变规律及

收稿日期: 2013-06-21

\*通讯作者

损伤门槛值的具体形式, 同时分析了围压对冻土的强化及弱化机理; 郑剑锋等<sup>[9]</sup>对冻结兰州黄土三轴压缩试验过程进行 CT 动态扫描, 获得了由 CT 数表示的土体损伤量表达式; 赵淑萍等<sup>[10]</sup>基于 CT 扫描试验, 得到采用 CT 数定义的损伤变量及其演化规律, 从而推导出适合冻土的损伤耗散势函数的具体形式; 张树光等<sup>[11]</sup>基于损伤和分形理论, 利用冻土单轴压缩试验, 建立了损伤变量和分形维数随应力变化的数学经验表达式; 金龙等<sup>[12]</sup>、Lai 等<sup>[13]</sup>基于损伤力学理论, 推导出冻土横观各向同性损伤变量的表达式, 利用冻结砂土三轴试验, 得出损伤变量的变化曲线; 孙星亮等<sup>[14]</sup>基于不可逆热力学理论, 建立冻土弹塑性各向异性损伤本构方程, 并分析冻土受载过程中的损伤特性。而对于冻结重塑黏土的损伤特性及其影响因素, 目前仍未有较系统的研究。

本文基于连续损伤力学理论及冻土横观各向同性损伤变量推导公式, 通过冻结重塑黏土常规三轴剪切试验, 系统研究了温度、含水率和围压 3 种因素对冻结重塑黏土损伤特性的影响, 分析得到了冻结重塑黏土的微观损伤特性及机理。

## 1 冻土损伤理论

### 1.1 冻土损伤本构关系

Rabotnov 引入一个与连续性变量相对应的变化量  $D$ , 称为损伤变量:

$$D = \frac{A - \tilde{A}}{A} , \quad (1)$$

式中,  $A$  为试样初始面积,  $\tilde{A}$  为受损后试样的净面积。

根据 Lemaitre 等效应力原理<sup>[15]</sup>, 应力作用在受损材料所引起的应变与等效应力作用在无损材料上引起的应变等效, 可得到一维问题中受损材料的应力应变关系<sup>[16]</sup>:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} , \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} , \quad (3)$$

$$\sigma = E\varepsilon(1-D) . \quad (4)$$

式中  $\tilde{E}$  为受损材料的弹性模量;  $E$  为无损材料的弹性模量, 即初始弹性模量;  $D$  为损伤变量。

冻土加载过程中, 由于土颗粒的重新定向导致冻土力学性能的各向异性, 采用各向同性损伤不能准确地描述冻土的损伤过程。在三维问题中, 有效应力为

$$\{\tilde{\sigma}\} = [M(D)]\{\sigma\} . \quad (5)$$

式中  $[M(D)]$  为损伤有效矩阵, 损伤有效矩阵为  $[M(D)] = \text{diag}\{1/W_{11}, 1/W_{22}, 1/W_{33}, 1/W_{12}, 1/W_{23}, 1/W_{13}\}$ ,

$W_{ij} = [(1-D_i)(1-D_j)]^{1/2}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $D_1, D_2, D_3$  分别为主轴的损伤变量。在冻土常规三轴剪切试验过程中, 横向平面内是各向同性的, 垂直于平面的方向性质不同, 表现为横观各向同性损伤, 即  $D_2 = D_3$ 。

假设冻土在初始状态(无损状态)下为各向同性, 无损土的柔度矩阵  $[C]^{-1}$  为

$$[C]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ,$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比。

损伤土的有效柔度矩阵为

$$[C]^{-1} = [M(D)]^T [C]^{-1} [M(D)] . \quad (6)$$

式中: 有效柔度矩阵各个分量为

$$C_{ii}^{-1} = \frac{1}{E(1-D_i)^2}, \quad C_{ij}^{-1} = \frac{-\nu}{E(1-D_i)(1-D_j)}, \quad i, j = 1, 2, 3;$$

$$C_{44}^{-1} = \frac{2(1+\nu)}{E(1-D_1)(1-D_2)}, \quad C_{55}^{-1} = \frac{2(1+\nu)}{E(1-D_2)(1-D_3)},$$

$$C_{66}^{-1} = \frac{2(1+\nu)}{E(1-D_3)(1-D_1)}, \quad \text{其余分量均为零。}$$

### 1.2 冻土各向异性损伤的计算方法

参照文献[12, 13], 选用割线弹性模量间接表示冻土在加载过程中细微观结构的变化及损伤演化过程是比较合适的。即

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} , \quad (7)$$

且

$$\{\varepsilon^e\} = [C]^{-1} \{\sigma\} . \quad (8)$$

由式(6)~(8), 得到横观各向同性损伤变量的表达式:

$$D_1 = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E}\right)^{\frac{1}{2}} , \quad (9)$$

$$D_3 = 1 - \frac{\nu}{\tilde{V}}(1-D_1) , \quad (10)$$

式中,  $\tilde{V}$  为受损材料的有效泊松比。

$$E_{\text{sec}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_1} , \quad (11)$$

$$\tilde{V} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \quad (12)$$

式中,  $E_{sec}$  为割线弹性模量, 以下简称割线模量,  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为竖向和环向应力,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_3$  分别为竖向和环向应变。

## 2 冻结重塑黏土三轴剪切试验

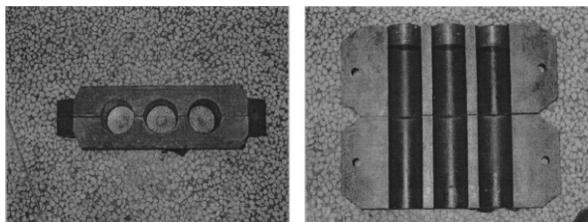
### 2.1 重塑土样制备

试验土样取自京新高速公路某路堑高边坡段, 其基本物理参数见表 1。首先取有代表性土样进行天然含水率和干密度的测定。再将土样切碎, 在  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  温度下恒温烘干, 放入干燥器中冷却至室温。将烘干、冷却的土样进行破碎。根据试验方案制定的含水率, 对干土进行配水, 并搅拌均匀, 密封后放入保湿器内养护 24 h 以上。彻底清洗模具 ( $\phi=61.8 \text{ mm}$ ,  $h=125 \text{ mm}$ ), 并在模具内表面涂上一层凡士林, 分次均匀将土样放入模具击实, 重塑土与原状土干密度差值控制在  $0.03 \text{ g/cm}^3$  以内。土样制备过程如图 1 所示。

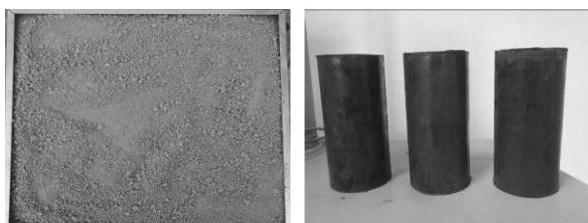
表 1 黏土基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of clay

土名	干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	天然含水 率/%	孔隙 比	塑限 /%	液限 /%
黏土	1.44	24.0	0.924	30.2	52.1



(a) 重塑土样的磨具(内径61.8 mm, 高度125 mm)



(b) 烘干磨碎的土样

(c) 脱模后的土样

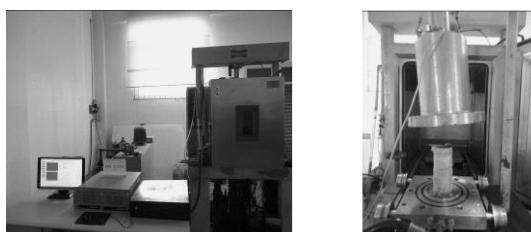
图 1 土样制备过程图

Fig. 1 Production process of soil samples

### 2.2 试验方法

冻结重塑黏土三轴剪切试验在 W3Z-200 型冻土低温三轴压缩试验机 (如图 2 所示) 中进行, 试验的加载、数据采集及结束均由计算机自动控制, 三轴试验机最大轴向加载能力为 200 kN, 最大围压为 15 MPa, 波动度在土 1% 以内, 最低温度为  $-35^{\circ}\text{C}$ , 精度为土 0.2

$^{\circ}\text{C}$ , 轴向变形测量范围为  $0 \sim 30 \text{ mm}$ , 轴向应变速率为  $1 \sim 5 \text{ mm/min}$ , 本次冻结重塑黏土三轴试验采用应变控制方式, 轴向应变加载速率为  $0.016 \text{ mm/s}$ , 三轴试验温度为  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$  和  $-20^{\circ}\text{C}$ , 重塑黏土含水率为 24.0% 和 30.0%, 围压为 0.5, 1.0 MPa, 冻结重塑黏土三轴剪切试验严格按照煤炭行业标准《人工冻土三轴剪切试验方法》MT/T593.4-2011 的要求进行, 冻土三轴剪切试验数据采集界面和土样破坏情况见图 3。

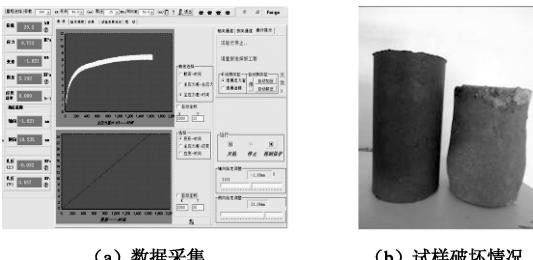


(a) 试验机外观图

(b) 装样示意图

图 2 W3Z-200 型冻土三轴试验机

Fig. 2 Triaxial testing machine of frozen soil W3Z-200



(a) 数据采集

(b) 试样破坏情况

图 3 冻土三轴试验数据采集界面和土样破坏情况

Fig. 3 Data acquisition and failure mode of soil samples

### 2.3 试验结果及分析

图 4 为冻结重塑黏土含水率为 24.0% 和 30.0% 时不同温度和围压条件下常规三轴剪切试验主应力差-应变曲线。可以看出, 在弹性应变阶段, 冻结重塑黏土主应力差随应变的增加迅速增大, 极限弹性应变小于 1.0%, 当进入塑性应变阶段, 主应力差逐渐趋于稳定, 结合土样破坏形态 (图 3), 得出冻结重塑黏土在试验条件下的破坏类型属于塑性破坏, 应力应变曲线属于硬化型, 土体表现为腰鼓状破坏特征, 且土样表面出现较多的纵向裂缝。在相同含水率条件下, 增大围压可以提高冻结重塑黏土的强度, 且在温度较低条件下, 围压对强度的提高效应比较明显。含水率为 30.0% 时的冻结重塑黏土强度略微高于含水率为 24.0% 的情况, 因而在一定含水率范围内, 增大含水率可以提高冻结重塑黏土的强度。

## 3 冻结黏土损伤影响因素分析

### 3.1 温度对冻结黏土损伤特性影响分析

根据不同试验工况条件下的应力 - 应变曲线, 得出割线模量 - 应变曲线(见图 5)。在相同含水率和围压条件下, 随着温度的降低, 峰值割线模量逐渐增大, 且峰值割线模量点即为损伤初始点, 损伤初始点对应的试验值即为损伤门槛值, 在土体压密阶段和弹性应变阶段, 割线模量迅速增大, 当进入塑性应变阶段后, 土体内部出现新的微裂纹, 且逐渐发展成宏观裂纹, 割线模量表现为迅速下降趋势, 最终趋于平稳。

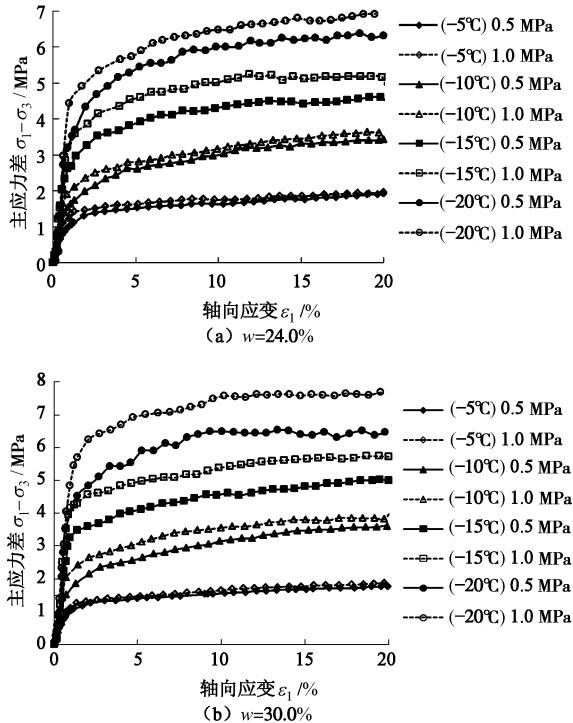


图 4 不同温度和围压条件下冻结重塑黏土应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of remolded frozen clay under different temperatures and confining pressures

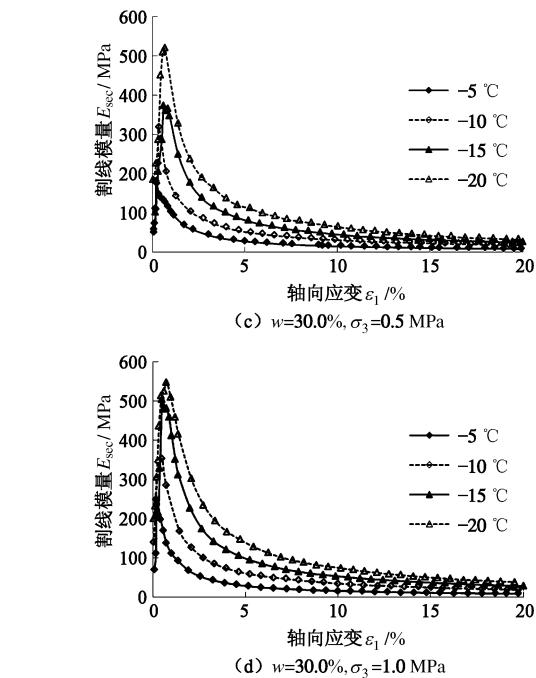
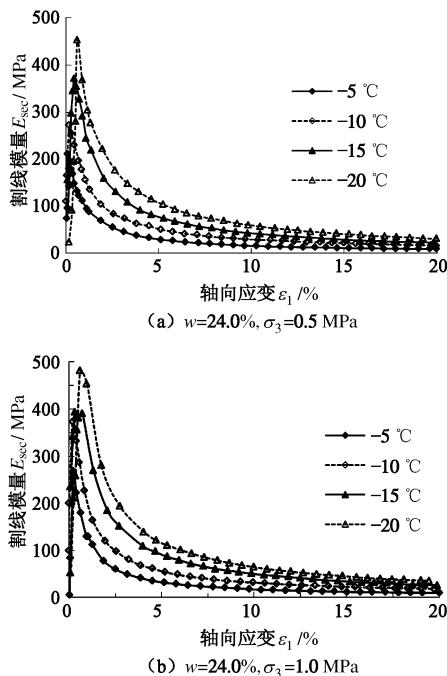
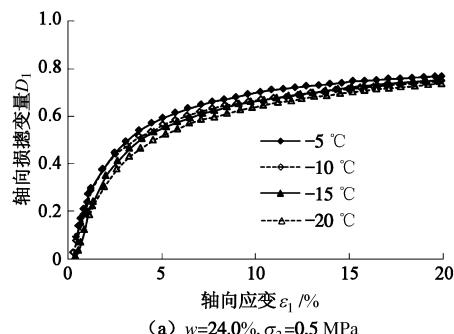


图 5 不同含水率和围压条件下割线模量  $E_{sec}$  - 应变  $\varepsilon_1$  曲线

Fig. 5 Damage variable  $D_1$ -axial strain  $\varepsilon_1$  curves under different moisture contents and confining pressures

根据三轴试验数据及冻土损伤阈值确定原则, 可以确定不同工况情况下的损伤初始点, 结合冻土横观各向同性损伤变量计算公式, 得到轴向损伤变量  $D_1$  - 轴向应变  $\varepsilon_1$  的变化曲线, 如图 6 所示。在不同试验工况条件下, 冻结重塑黏土轴向损伤变量在加载过程中变化趋势一致, 在割线模量达到峰值以后, 冻土内部出现新的微裂纹, 土体开始进入损伤阶段, 损伤阶段的前期损伤变量急剧上升, 后期变化相对平缓, 当轴向应变达到 20% 时, 损伤变量趋于稳定, 且最大轴向损伤变量  $D_{1max}$  一般在 0.6~0.8, 而在同一含水率和围压条件下, 随着温度的降低, 轴向损伤变量逐渐减小。因此, 降低温度可以减小和延缓冻结重塑黏土损伤的发生和发展, 强化其土体结构, 特别是围压为 1.0 MPa 时, 温度的这种强化冻土结构、减小损伤程度和抑制损伤发展的效应更加明显, 结合不同含水率和围压条件下冻结重塑黏土损伤初始点轴向应变  $\varepsilon_0$  和割线模量  $E_0$  - 温度  $T$  曲线(见图 7), 同样可以说明温度对



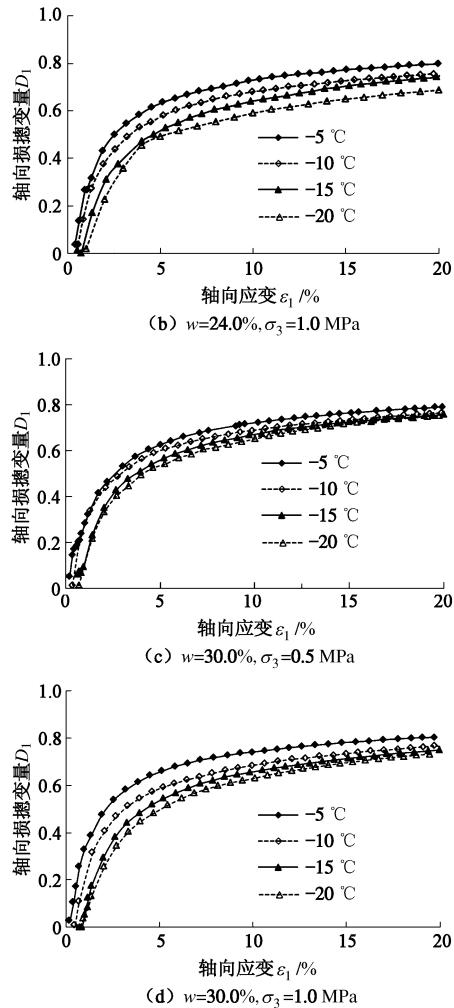


图 6 不同含水率和围压条件下冻结重塑黏土轴向损伤变量  $D_1$ -轴向应变  $\varepsilon_1$  曲线  
Fig. 6 Damage variable  $D_1$ -axial strain  $\varepsilon_1$  curves of frozen clay under different moisture contents and confining pressures

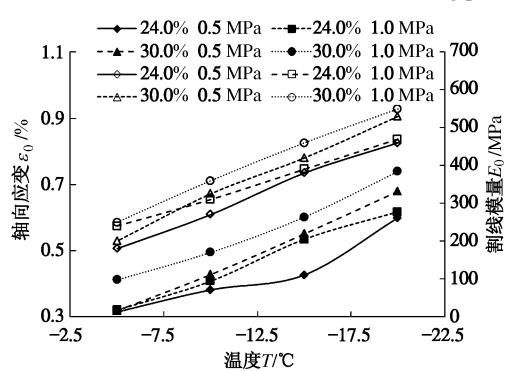
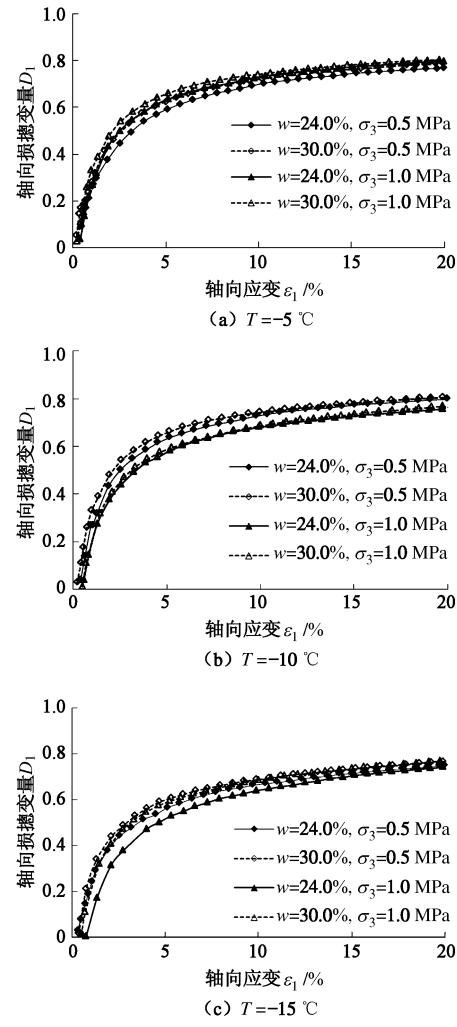


图 7 不同含水率和围压条件下冻结重塑黏土损伤初始点轴向应变  $\varepsilon_0$  和割线模量  $E_0$ -温度  $T$  曲线  
Fig. 7 Damage strain  $\varepsilon_0$  and secant modulus  $E_0$  of threshold axial strain  $\varepsilon_1$  curves of remolded frozen clay under different moisture contents and confining pressures

冻土损伤的影响规律，随着温度的降低，冻结重塑黏土损伤应变门槛值逐渐增大，一般在 0.3%~0.7%，对应的割线模量一般在 200~550 MPa。

### 3.2 含水率对冻结黏土损伤特性影响分析

图 8 不同温度条件下冻结重塑黏土轴向损伤变量  $D_1$ -轴向应变  $\varepsilon_1$  曲线。从图 8 (a) 可以看出，含水率为 24.0% 时冻结重塑黏土轴向损伤变量小于含水率为 30.0% 的情况，从图 8 (b)、8 (c) 和 8 (d) 中可以看出，随着温度的逐渐降低，含水率较大时冻结重塑黏土的损伤程度比较明显，可见当含水率较大时，降低温度可以提高冻土内部冰晶和土颗粒的咬合作用及颗粒间的摩擦效应，致使其初始割线模量较大，早期强度较好，而随着微裂纹的进一步萌生和发展，冻土体内冰晶对土颗粒起到一定的润滑作用，从而加快了其结构的损伤和力学性质的恶化，因而表现出冻土后期损伤发展进程加快，而在温度较高时，土体内部本身含有较多的未冻结水，而含水率对其早期强度特性影响不大，不同含水率对冻土损伤后期的影响程度就不明显。从图 7 可以看出，初始割线模量和温度之间存在较好的线性增长关系，降低温度可以明显提高冻结重塑黏土的早期强度，当温度为 -20℃，含水率为 30.0% 时，围压为 0.5, 1.0 MPa 情况下，初始割线模量分别为 550, 560 MPa，而含水率较大可加剧其后期强度的减小，因而表现出其损伤特性比较明显。



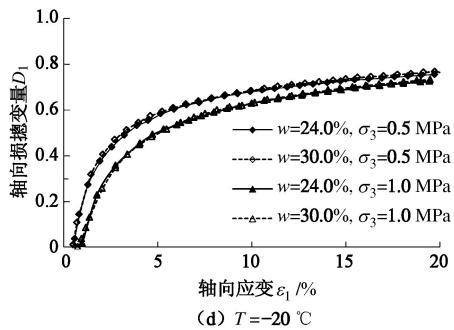


图 8 不同温度条件下冻结重塑黏土轴向损伤变量  $D_1$ -轴向应变  $\varepsilon_1$  曲线  
(d)  $T = -20^\circ\text{C}$

Fig. 8 Damage variable  $D_1$ -axial strain  $\varepsilon_1$  curves of remolded frozen clay under different freezing temperatures

### 3.3 围压对冻结黏土损伤特性影响分析

从图 8 可以看出, 当温度为  $-20^\circ\text{C}$  时, 冻结重塑黏土在 1.0 MPa 围压下的损伤变量明显小于围压为 0.5 MPa 的情况, 且几乎不受含水率影响, 而在温度为  $-5^\circ\text{C}$  时(图 8(a)), 围压为 1.0 MPa 时冻结重塑黏土损伤量大于围压为 0.5 MPa, 且含水率对其也有比较明显的影响, 可见围压对冻结重塑黏土结构的强化及损伤的减少和延缓效应需要一定的条件, 在冻结水平较低时, 冻土体内部仍然存在较多的未冻结水, 特别是对于颗粒级配较均匀的黏性土, 增大围压不能有效地减小其损伤程度, 而只有当冻土冻结达到一定程度之后, 随着围压的增大, 土颗粒间的摩擦力增强, 增大围压才能有效地强化冻土结构和提高冻土强度, 减小冻土的损伤程度。相比冻结砂性土, 围压对强化冻结黏性土结构的效应不明显<sup>[12]</sup>, 在试验围岩条件下, 增大围压不会明显减小冻结重塑黏土的损伤程度。

## 4 结 论

根据本次试验研究结果, 可得出以下 4 点结论。

(1) 在不同影响因素条件下, 冻结重塑黏土损伤特性及演化规律一致。当其进入塑性变形阶段后, 损伤开始发生, 在土体变形早期, 其损伤发展速率较大, 后期逐步趋于平缓, 且最大轴向损伤变量  $D_{1\max}$  一般在  $0.6\sim0.8$ 。

(2) 温度对冻结重塑黏土损伤特性及演化规律影响较明显, 降低温度可以明显强化其结构, 减小其损伤量, 延缓其损伤的发生和发展。初始割线模量和损伤应变门槛值与温度之间存在较好的线性增长关系, 温度越低, 初始割线模量和损伤应变门槛值越大, 且冻结重塑黏土损伤应变门槛值  $\varepsilon_0$  一般在  $0.3\%\sim0.7\%$ , 对应的割线模量一般在  $200\sim550$  MPa。

(3) 含水率和围压对冻结重塑黏土损伤特性的

影响效应与温度存在一定的相关性。温度较低时, 围压可以强化其结构和减小损伤发生, 而增大含水率会增强冻结重塑黏土的早期强度, 加剧其后期损伤程度。

(4) 本文对冻结重塑黏土的损伤特性及影响因素进行了初步探讨和研究, 研究得到了冻结重塑黏土在不同温度、含水率和围压条件下的损伤特性, 为准确得到冻结重塑黏土损伤演化方程及本构关系提供一定的试验参考和依据, 但要得到比较系统和全面的冻结黏土损伤特性及机理, 还需要做大量的工作。

## 参 考 文 献:

- [1] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985. (TSYTOVICH H A. Mechanics of frozen soil[M]. ZHANG Chang-qing, ZHU Yuan-lin, translators. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [2] ZHU Y, CARBEE D L. Uniaxial compression strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Region Science and Technology. 1984, **9**: 3-15.
- [3] 李兆霞. 损伤力学的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LI Zhao-xia. Theories and application of damage mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [4] 吴鸿遥. 损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. (WU Hong-yao. Damage mechanics[M]. Beijing: National Defense and Industry Press, 1990. (in Chinese))
- [5] KRAJCINOVIC D, FONSEKA G U. The continuous damage theory of brittle materials[J]. Journal of Applied Mechanics, ASME, 1981, **48**: 809-815
- [6] CHABOCHE J L. Continuum damage mechanics: part I—general concepts[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, **55**: 59-64.
- [7] 维亚洛夫 C C. 土力学流变原理[M]. 杜余培, 译. 北京: 科学出版社, 1987. (VIALOV C C. Rheological theroy of soil mechanica[M]. DU Yu-pei, tran. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese))
- [8] 何 平, 程国栋, 朱元林. 冻土黏弹塑损伤耦合本构理论[J]. 中国科学 D 辑, 1999, **29**(增刊 1): 34-39. (HE Ping, CHENG Guo-dong, ZHU Yuan-lin. Permafrost viscoelastic-damage coupled plastic constitutive theory[J]. Science in China (Series D), 1999, **29**(S1): 34-39. (in Chinese))
- [9] 郑剑锋, 马 巍, 赵淑萍, 等. 三轴压缩条件下基于 CT 实时监测的冻结兰州黄土细观损伤变化研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(4): 839-845. (ZHENG Jian-feng, MA Wei, ZHAO Shu-ping, et al. Study of meso-damage changes of frozen

- Lanzhou loess under triaxial compression based on CT real-time monitoring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 839 – 845. (in Chinese))
- [10] 赵淑萍, 马 巍, 郑剑锋, 等. 基于 CT 单向压缩试验的冻结重塑兰州黄土损伤耗散势研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2019 – 2025. (ZHAO Shu-ping, MA Wei, ZHENG Jian-feng, et al. Damage dissipation potential of frozen remolded Lanzhou loess based on CT uniaxial compression test results[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2019 – 2025. (in Chinese))
- [11] 张树光, 张向东, 易 富. 单轴压缩条件下冻土的动态损伤和分形演化规律[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 185 – 187. (ZHANG Shu-guang, ZHANG Xiang-dong, YI Fu. A timely damage and fractal evolution rule of uniaxial compression for frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S): 185 – 187. (in Chinese))
- [12] 金 龙, 赖远明, 高志华, 等. 冻结砂土的损伤试验研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 306 – 312. (JIN Long, LAI Yuan-ming, GAO Zhi-hua, et al. Experimental study of the damage of frozen sandy soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(2): 306 – 312. (in Chinese))
- [13] LAI Y M, JIN L, CHANG X X. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25(6): 1177 – 1205.
- [14] 孙星亮, 汪 稔, 胡明鉴. 冻土弹塑性各向异性损伤模型及其损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3517 – 3521. (SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. An elasto-plastic anisotropic damage model for frozen soil and its damage analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3517 – 3521. (in Chinese))
- [15] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials[M]. London: Cambridge University Press, 1990. 159 – 168.
- [16] 卡恰诺夫 L M. 连续介质损伤力学引论[M]. 杜善义, 王殿富, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 43 – 47. (KACHANOV L M. An introduction to damage mechanics of continuous media[M]. DU Shan-yi, WANG Dian-fu, trans. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1989: 43 – 47. (in Chinese))

## 第十一届全国桩基工程学术会议在宜兴召开

今年是中国土木工程学会土力学与岩土工程分会桩基础学术委员会、中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会成立 20 周年。在此两委员会诞生 20 周年之际, 两委员会联合江苏省土木工程学会于 10 月 16 日到 18 日在江苏省宜兴市召开了“第十一届全国桩基工程学术会议”。此次会议由宜兴市建设局、建基建设集团有限公司和浙江理工大学等单位承办。

来自中国建筑科学研究院、东南大学、河海大学、同济大学、上海交通大学、浙江大学、中国铁道科学研究院等等国内

各大高校及研究机构的 400 多名桩基工程专家、学者和工程技术人员参加了会议, 进行学术交流。会上, 中国建筑科学院刘金砺、华东建筑设计院王卫东和中国建筑科学研究院高文生分别就桩基础研究若干进展、桩基础设计实际与相关工程问题和成桩技术新进展做了桩基发展水平报告。3 天会期内, 专家、学者和工程技术人员就桩基试验、设计计算、施工技术和检测技术等进行了深入交流。

大会取得了圆满的成功, 收到了预期的效果。

(东南大学 刘松玉 章定文 供 稿)