

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

赵淑萍¹, 马巍¹, 郑剑锋¹, 焦贵德^{1, 2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 首先分析了冻土损伤的物理本质, 然后在改进了的与 CT 试验机配套使用的三轴试验仪基础上, 进行了一系列的单向压缩试验过程的 CT 扫描, 获得了冻结重塑兰州黄土试样的屈服应变、损伤应变临界值、破坏应变临界值; 发现如果用塑性应变表示损伤阈值, 则温度越低、试样的损伤阈值越大; 最后通过 CT 数定义损伤变量, 获得了冻结重塑兰州黄土的损伤演化规律和损伤耗散势函数。

关键词: 冻结重塑兰州黄土; CT 扫描试验; 损伤应变临界值; 破坏应变临界值; 损伤演化方程; 损伤耗散势

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)11-2019-07

作者简介: 赵淑萍(1976-), 女, 江苏靖江人, 博士, 副研究员, 主要从事冻土力学和寒区工程方面的研究工作。E-mail: shuping@lzb.ac.cn。

Damage dissipation potential of frozen remolded Lanzhou loess based on CT uniaxial compression test results

ZHAO Shu-ping¹, MA Wei¹, ZHENG Jian-feng¹, JIAO Gui-de^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Civil and Engineering Department, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The physical nature of frozen soil damage is analyzed. A series of CT scanning during the uniaxial compress test process is conducted on an enhanced triaxial system which works together with the CT system. According to the test results, the yield strain, damage strain critical value, and failure strain critical value of the frozen remolded Lanzhou loess are obtained. Then, the plastic strain is used to describe the damage threshold value. The lower the temperature, the larger the damage threshold value. In the end, the CT value is used to define damage variable, and the damage evolution law is derived based on the results of CT scanning tests. A damage potential function suitable for frozen soil is proposed.

Key words: frozen remolded Lanzhou loess; CT scanning test; damage strain critical value; failure strain critical value; damage evolution equation; damage dissipation potential

0 引言

冻土的本构关系研究是冻土研究十分重要的内容, 一方面本构关系可以描述冻土的宏观变化, 另一方面可以用于数值计算、变形预测, 为工程设计以及稳定性评价提供依据。一些学者从热力学基本原理出发研究了冻土的本构关系, 提出冻土损伤耗散势是本构关系的关键之一^[1-4]。这些工作中, 较多的是假设损伤耗散势的某种形式, 然后建立本构关系, 而通过试验得到损伤耗散势的较少。

近年来, CT (Computer tomography) 扫描技术在岩土工程中得到广泛应用。一些学者通过 CT 试验观

测土体的细观结构变化, 并用 CT 数来定义损伤, 从而给出损伤随应变的发展过程, 但主要是对普通非冻土和岩石进行的工作^[5-10]。如孙红等在室温条件下, 对取自上海的粉质黏土和黏土进行了 CT 试验, 发现在受荷过程中粉质黏土的损伤变量与主应变之间呈指数函数关系, 而黏土的损伤变量与主应变之间呈线性关系^[10]。利用 CT 试验对冻土进行的研究工作, 主要是定性地描述冻土在受荷过程中的细观结构变化^[11-15], 而定量地给出冻土损伤耗散势的工作很少。刘增利等

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41023003, 40971046, 41001041)

收稿日期: 2011-12-26

作了一些初步工作,在 -7°C 条件下对冻结兰州黄土的单轴压缩过程进行了 CT 扫描,试验结果表明,对于饱和、非饱和冻结兰州黄土,损伤与应变之间的关系均为线性关系^[16]。

在这样的背景下,本文在改进了的与 CT 试验机配套使用的三轴试验仪的基础上,进行了一系列的 CT 扫描试验,通过 CT 数定义损伤变量,获得损伤演化规律,从而推导出适合冻土的损伤耗散势函数的具体形式。

1 冻土损伤的物理本质及定义

1.1 冻土损伤的物理本质

根据损伤力学中的定义,在一定荷载与环境下引起材料性能劣化的微结构变化称为损伤^[17-18]。在微观尺度下,在缺陷或界面附近,微应力累积和连接键破坏,这两者都使材料产生损伤;在细观尺度的典型体元中,损伤是指微裂纹或微孔洞的增长和连通,这两者均使裂纹萌生;在宏观尺度下,则是指裂纹的扩展。微观尺度是研究应变和损伤机理的尺度;细观尺度是建立力学分析结构方程的尺度;宏观尺度是研究工程结构的尺度。从微观尺度来讲,损伤可以由一个通用的脱键机理所描述,然而,在细观尺度,损伤是以不同的方式表现出来,它取决于材料的性质、载荷的类型以及温度,分为脆性损伤、延性损伤、蠕变损伤。

冻土是由土颗粒、冰、水、气体组成的混合物。土颗粒构成骨架,在土颗粒骨架之间存在大小不同、形状各异的孔隙,孔隙中充填着冰、水和气体。土颗粒之间存在接触联结、毛细水联结、结合水联结和冰联结作用等。外部力荷载作用下,冻土内部可能发生多种引起冻土强度弱化的变化,这些变化都将引起冻土体内联结作用的破坏。借助损伤力学的概念,将冻土中各种联结作用的破坏定义为损伤。但是,损伤力学是在微观尺度上研究损伤机理、在细观尺度上用损伤变量描述损伤,而在冻土研究中,损伤机理的研究和损伤的描述都是在细观尺度上进行。另外,因为冻土的损伤伴随着塑性变形的发生,且都与时间相关,因此,冻土的损伤属于蠕变损伤。从现有的 CT 扫描、电镜试验资料可以分析冻土内部的细观变化机理^[11-15, 19-20]。外部荷载作用下,冻土内部可能发生各种弱化作用,如土颗粒的破碎、土颗粒沿剪切面方向定向排列、冰的黏塑性流动、孔隙冰的压融、微裂纹的发生、扩展、贯通、分叉,形成环状、羽状或网状裂纹;也可能发生强化作用,如基本单元体之间的压密、孔隙率减小、压融冰的重结晶。可见,从细观尺度上分析,导致冻土强度弱化和强化的因素有多种,而我们却无

法定量测量每一种因素,并分析其在土体总的强度弱化中所占的比重。幸运的是,冻土内的损伤不仅仅存在于细观水平的单个平面,而是存在于许多平面上,因此,可以做均匀化,用一个损伤变量来描述冻土体内各种弱化作用而引起的整体损伤效果。

1.2 冻土的损伤表示

损伤力学^[17-18]里面用连续性变量 φ 或损伤度 D 来表示损伤,连续性和损伤度互为相补参量,即

$$\varphi = 1 - D. \quad (1)$$

用密度的变化来定义损伤度,则

$$D = \frac{\rho_0 - \rho_j}{\rho_0}, \quad (2)$$

式中, ρ_0 , ρ_j 分别为初始密度和受损后的密度。

CT 数的定义为

$$H' = k \left(\frac{\rho \mu_m - \mu_{\text{标}}}{\mu_{\text{标}}} \right). \quad (3)$$

式中 H' 为某一像素点的原始 CT 数; μ_m 为某物质的 X 射线质量吸收系数; $\mu_{\text{标}}$ 为标准物质的 X 射线吸收系数; k 为分度因子。

令 $H = H' + k$, $a = \frac{k \mu_m}{\mu_{\text{标}}}$, 且假设在同一个样品的扫描过程中, k , a 不变,则式 (3) 可以变为

$$H = a \rho. \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (2) 可得,

$$D = 1 - \frac{H_j}{H_0}. \quad (5)$$

为了体现 CT 机分辨率的影响,将式 (5) 变为

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left(1 - \frac{H_j}{H_0} \right). \quad (6)$$

式中 m_0 为 CT 试验机的分辨率; H_0 为试样未发生损伤时的 CT 数; H_j 为试样在受力过程中发生损伤时的 CT 数。式 (6) 即为用 CT 数定义的损伤度。

2 冻土的 CT 扫描试验

2.1 试样准备

试验所使用的土取自兰州市东岗镇,称为兰州黄土,液限 29.36%,塑限 14.92%,塑性指数 14.44%。颗粒分布曲线见图 1,按照国际通用的土的分类标准 (Unified soil classification system),定名为低液限黏土。

将野外取回的土样风干、碾碎,过 2 mm 的分析筛,取粒径小于 2 mm 的土。为了减小土中的盐对 CT 扫描试验 (即 CT 数) 的影响,对土样进行洗盐,洗 7~8 d,最后晾干备用。将土加蒸馏水配成一定含水率的湿土,置于保湿缸中 12 h 以上,根据干密度计算

所需的湿土质量, 并将湿土全部倒入制样筒。采用整体压实法在标准制样机上压制试样, 压制成的试样直径 61.8 mm, 高 125 mm。压制时, 先将土压实到一定高度 h_1 , 然后将试样倒过来, 从另一头压实。成批制样之前, 先进行试验, 采用不同的力 F 、不同的第一次压实高度 h_1 来制样, 并将制得的试样分成 5 段, 测试各段的干密度 (测试照片见图 2), 当各段干密度相差不超过 0.03 g/cm^3 时, 认为压制时所采用的 F 和 h_1 是合理的, 然后根据这个 F 和 h_1 成批制样。

试样制好后装入模具中, 并放入专用的饱水装置中进行抽气饱水, 抽真空时间为 1 h, 饱水时间为 12 h。然后将试样和模具一起放入冷库中快速冻结 24 h 后, 进行脱模、取样。

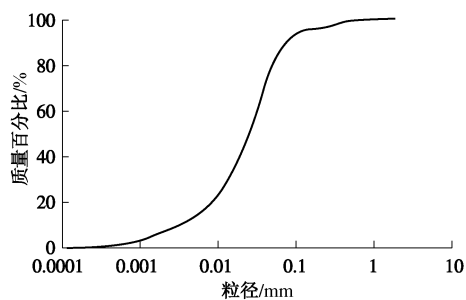


图 1 试验土样的颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain distribution curve of test soil

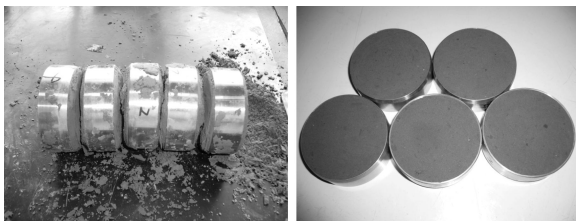


图 2 测试试样各段密度照片

Fig. 2 Photo of measuring density of each segment of sample

2.2 试验仪器和扫描方法

本次试验使用的是 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射线螺旋 CT 机 (图 3), 空间分辨率是 $0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$, 可以识别的最小体积为 0.12 mm^3 (层厚 1 mm), 密度对比分辨率为 0.3% (3 Hu)。

CT 试验机配套使用的三轴试验系统进行了改进, 由试验罐和加载装置组成。试样装入罐内并恒温 24 h 后, 进行第 1 次 CT 扫描, 然后开始单向压缩试验, 并根据试样变形情况在不同的时间点上进行扫描, 总共扫描 9 次。每次从上至下扫描 5 层 (图 4 (a))。分别对每一个层面的不同区域进行测量, 包括全区、大区、中心区、外围和中环 (图 4 (b))。试验仪器以及各区的详细介绍见文献[21]。



图 3 带有三轴仪的 CT 扫描系统

Fig. 3 CT scanning system with triaxial test apparatus

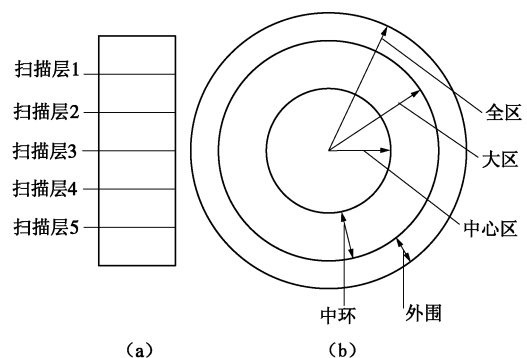


图 4 扫描层位及每层各区的划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of scanning layers and subarea of each layer

2.3 试验条件

对冻结饱水兰州黄土试样在不同温度条件下进行单向压缩试验, 不施加围压, 采用恒应变速率加载方式, 加载速率为 0.33 mm/min 。试样全部为重塑饱水试样, 含水率为 22.8%、干密度为 1.63 g/cm^3 。试验温度为 -5.1°C , -1.7°C , -1.2°C , -0.6°C 。

3 试验结果及分析

3.1 应力应变曲线

不同温度条件下, 冻土的轴向应力和轴向应变之间的关系曲线如图 5 所示。可以看出, 初始阶段发生弹性变形, 但弹性模量相差很大, 温度越低, 弹性模量越大; 当应变达到 0.7% 时, 发生屈服, 产生塑性变形; 当应变为 10% 左右时, 应力达到最大值, 试样发生破坏, 此后, 应变继续增加, 应力下降。

3.2 CT 数和 CT 图像随应变的发展变化

在冻土试样单向压缩试验的过程中进行 CT 扫描, 每一个试样扫描 9 次, 每次扫描 5 个断面, 每个断面测量不同区域的 CT 数。从不同层位的 CT 数可以看出, 中间三层的 CT 数比较接近, 而上下端部两层的 CT 数

差异相对较大,因此取中间三层的CT数平均后作为该区域的CT数。试验结果显示,各区的CT数随应变的发展变化趋势一致,且全区CT数体现的是整个试样的平均变化趋势,因此,仅将全区CT数随应变的关系曲线示于图6中。在应变0~0.7%的阶段,试样的CT数轻微增大,试样处于压密阶段;随后,在0.7%~6.5%的阶段,所有试样的CT数变化不大,稍有减小的趋势,说明试样处于结构调整阶段;当应变大于6.5%以后,所有试样的CT数快速变小。

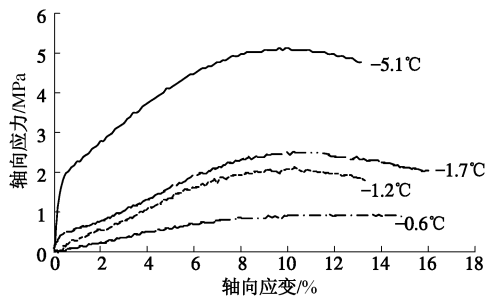


图5 不同温度条件下冻土的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of frozen Lanzhou loess under different temperature conditions

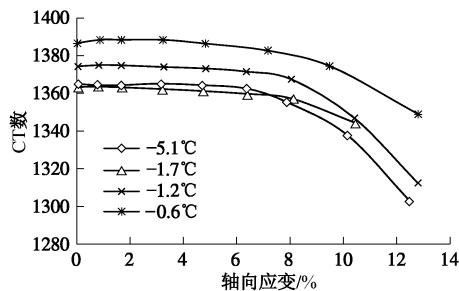


图6 不同温度时试样全区CT数随应变的变化曲线

Fig. 6 CT value vs. strain curves of frozen remolded Lanzhou loess under different temperature conditions

综合分析图5,6可以得到如下结论:应变0~0.7%的阶段,试样发生弹性变形;应变0.7%~6.5%的阶段,试样开始发生塑性变形,但还没有开始发生损伤;当应变大于6.5%时,损伤开始发生,直至应变达到10%时,试样发生破坏。因此,对所试验的冻结重塑兰州黄土来说,其屈服应变为 $\varepsilon_y = 0.7\%$;损伤应变临界值为 $\varepsilon_{th} = 6.5\%$;破坏应变临界值为 $\varepsilon_f = 10\%$ 。

CT扫描图像是与物质对X射线吸收系数相关的数字图像,每一像素点对应一个CT数,在图像上表现为不同的灰度。物质的密度越大,CT数值越大,表现在CT扫描图像上亮度越高;反之,密度越小,图像上的亮度就越低;因此CT扫描图像上的黑色区域为低密度区,白色区域为高密度区,微裂纹、孔洞的密度最小,CT数也最小,表现在图像中为黑色。由于采集到的CT图像很多,选取其中的一组示于图7。可以看出,在

初始状态,CT图像以高密度的白色区域为主;从初始状态到应变0.7%的时候,白色区域稍有增加;应变从0.7%增加到6.5%时,CT图像变化不大,黑色区域稍有增加;应变从6.5%增加到10%时,CT图像发生明显变化,变成以低密度的黑色区域为主。

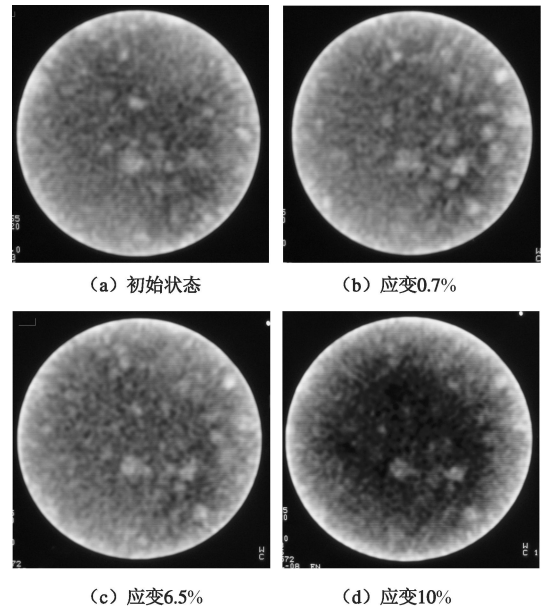


图7 -0.6°C时试样在不同受力阶段的中间层位CT图像

Fig. 7 CT scanning images of frozen soil in different load stages under -0.6°C

3.3 损伤度与应变的关系

利用式(6)及上述试验所得的CT数,可以计算试样不同区域的损伤度。图8显示了全区损伤度随轴向应变的变化。不同温度条件下试样的全区损伤度比较集中,可以拟合到一条线上。与全区损伤度一样,其它各区的损伤度也可以拟合到一条线上,见图9。从图9可以看出中心区损伤大于中环损伤,中环损伤大于外围损伤,说明试样的破坏是沿径向由内而外发生,试样中心最容易发生破坏。全区损伤度值介于外围和中环之间,是整个试样破坏程度平均效果的体现。

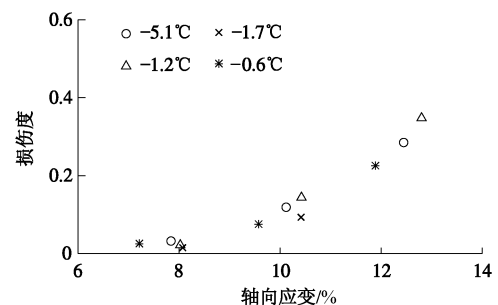


图8 不同温度时试样全区损伤度随应变变化关系

Fig. 8 Damage variable vs. strain of frozen Lanzhou loess under different temperature conditions

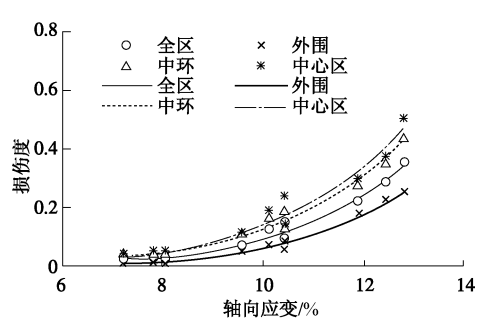


图 9 各区损伤度随应变发展变化关系

Fig. 9 Damage variable of different regions vs. strain curves of frozen Lanzhou loess

如前所述,在本次试验的所有温度条件下,试样的破坏应变临界值 $\varepsilon_f=10\%$ 。而图 9 显示的损伤变量也正好与此对应,当应变小于 10%,损伤度变化较小,在 0~0.1 之间变化,而当应变大于 10%时,损伤度快速增大,在 0.1~0.6 之间变化。

3.4 用塑性应变表示的损伤阈值

当只考虑总的轴向应变时,不同温度条件下试样的损伤应变临界值 ε_{th} 均为 6.5%。而轴向应变由弹性应变和塑性应变构成, $\varepsilon=\varepsilon^e+\varepsilon^p$ 。根据应力应变曲线上初始加载的直线段,可以得到不同温度条件下试样的初始弹性模量,如表 1 所示。利用初始弹性模量,计算出试样在各个加载阶段的弹性应变,然后用轴向应变减去弹性应变,就可以得到塑性应变。用塑性应变表示冻土的损伤阈值 ε_{th}^p ,如表 2,可见,温度越低,试样的损伤阈值 ε_{th}^p 越大。

表 1 不同温度条件下试样的弹性模量值

Table 1 Elastic moduli of samples under different temperature conditions				
温度/℃	-5.1	-1.7	-1.2	-0.6
弹性模量/MPa	409	100	59.2	12.3

表 2 用塑性应变表示的损伤阈值 ε_{th}^p

Table 2 List of damage threshold value				
温度/℃	-5.1	-1.7	-1.2	-0.6
损伤阈值 ε_{th}^p /%	5.83	4.88	4.02	0.3

3.5 损伤演化方程

为了方便推导损伤耗散势,计算出不同温度下各个试样不同区域的连续性变量值 φ 以及对应的塑性应变。图 10 给出了连续性变量的平方 φ^2 与塑性应变 ε^p 之间的关系。可以看出,用全区、外围、中环、中心区 CT 数定义的连续性变量值,都具有相同的变化规律。

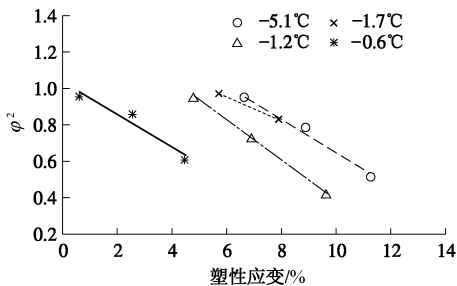
连续性变量与塑性应变间的关系可用下式表示:

$$\varphi^2 = a\varepsilon^p + b \quad , \quad (7)$$

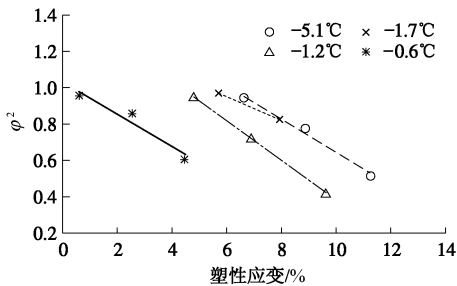
即

$$D = 1 - \sqrt{(a\varepsilon^p + b)} \quad , \quad (8)$$

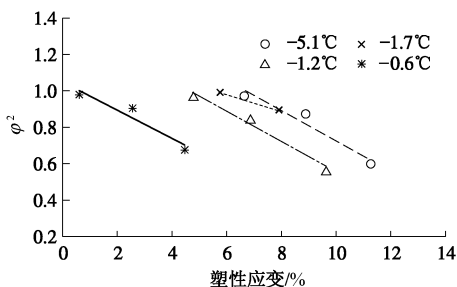
式中, a, b 为材料参数。



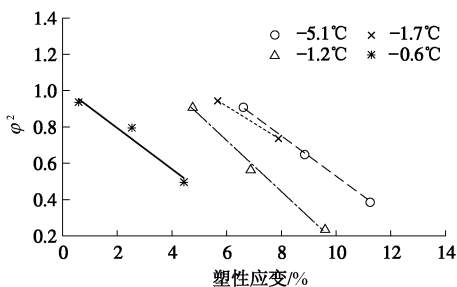
(a) 全区连续性变量



(b) 外围连续性变量



(c) 中环连续性变量



(d) 中心区连续性变量

图 10 试样各区连续性变量与塑性应变的关系

Fig. 10 Continuous variable vs. strain curves of frozen Lanzhou loess

无论是全区 CT 数,还是用全区 CT 数定义的损伤,都是体现对应量的平均变化趋势,因此给出全区损伤度与塑性应变关系式中的参数值,见表 3。

表 3 式(7)、(8)中的参数 a, b

Table 3 Values of a, b in Equation (7) or (8)				
温度/℃	-5.1	-1.7	-1.2	-0.6
a	-0.0933	-0.0654	-0.1094	-0.0903
b	1.5769	1.3436	1.4774	1.034

3.6 损伤耗散势

损伤力学里面将损伤耗散势设为如下形式:

$$\Phi_D = \frac{Y^m}{2\delta_0 \varphi^n}, \quad (9)$$

式中, Y 为损伤扩展力, m, n, δ_0 为材料参数。

借鉴式 (9), 取 $m=1, n=1$, 冻土的损伤耗散势可写为^[3]

$$\Phi_D = \frac{Y}{2\delta_0 \varphi}. \quad (10)$$

损伤度和连续性变量演化方程可表达为

$$\dot{D} = -\lambda \frac{\partial \Phi_D}{\partial Y}, \quad (11)$$

$$\dot{\varphi} = \lambda \frac{\partial \Phi_D}{\partial Y}. \quad (12)$$

将式 (10) 代入式 (12) 得到

$$\dot{\varphi} = \lambda \frac{1}{2\delta_0 \varphi}, \quad (13)$$

式中, λ 为比例系数, 对于单轴压缩情况, 取 $\lambda = \varepsilon^p$ 。因此

$$\dot{\varphi} = \varepsilon^p \frac{1}{2\delta_0 \varphi}. \quad (14)$$

积分后得到

$$\varphi^2 = \frac{1}{\delta_0} \varepsilon^p + \kappa_0. \quad (15)$$

比较式 (7)、(15) 可见, 二者的形式吻合, 因此, 对于本次试验条件下的冻结兰州黄土, 损伤耗散势可取为

$$\Phi_D = \frac{Y}{2\delta_0(1-D)} = \frac{Y}{2\delta_0 \varphi}, \quad (16)$$

式中, Y 为损伤扩展力, δ_0 是与冻土温度有关的材料参数。

损伤耗散势函数式 (16), 与 He 等^[3]在构建已冻土的力学本构模型时所使用的损伤耗散势形式是一致的。

4 结 论

本文首先分析了冻土损伤的物理本质, 然后在改进了与 CT 试验机配套使用的三轴试验仪基础上, 进行了一系列的 CT 扫描试验, 通过 CT 数定义损伤变量, 获得损伤演化规律, 从而推导出适合冻土的损伤耗散势的具体形式。得到如下 3 点结论。

(1) 对于试验所用的冻结重塑兰州黄土试样, 屈服应变为 $\varepsilon_y = 0.7\%$; 损伤应变临界值为 $\varepsilon_{th} = 6.5\%$; 破坏应变临界值为 $\varepsilon_f = 10\%$ 。

(2) 如果用塑性应变表示损伤阈值, 则温度越低, 试样的损伤阈值 ε_{th}^p 越大。

(3) 对于试验所用的冻结兰州黄土, 损伤演化方程可表示为 $D = 1 - \sqrt{(a\varepsilon^p + b)}$, 损伤耗散势可表示为

$$\Omega_D = \frac{Y}{2\delta_0(1-D)}.$$

参考文献:

- [1] SHEN M, LADANYI B. Modeling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14: 237 - 246.
- [2] MIAO Tian-de, WEI Xue-xia, ZHANG Chang-qing. Creep of frozen soil by damage mechanics [J]. Science in China (Series B), 1995, 38(8): 996 - 1002.
- [3] HE Ping, ZHU Yuan-lin, CHENG Guo-dong. Constitutive models of frozen soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(4): 811 - 816.
- [4] 朱志武, 宁建国, 马 巍. 基于损伤的冻土本构模型及水、热、力三场耦合数值模拟研究[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2010, 40(6): 758 - 772. (ZHU Zhi-wu, NING Jian-guo, MA Wei. The constitutive model of frozen soil with damage and numerical analysis for the coupled problem of water, temperature and stress fields[J]. Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2010, 40(6): 758 - 772. (in Chinese))
- [5] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998. (YANG Geng-she, ZHANG Chang-qing. Detect the damage of rocks[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998. (in Chinese))
- [6] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. Macro and Micro test research on damage mechanics of rock and soil[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [7] 作彦卿, 丁卫华, 曹广祝. 岩石单轴与三轴 CT 尺度裂纹演化过程观测[J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(2): 115 - 119. (WU Yan-qing, DING Wei-hua, CAO Guang-zhu. Observation and detection of evolution process rock crack on CT scale under uniaxial and triaxial compression conditions[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, 19(2): 115 - 119. (in Chinese))
- [8] 李晓军, 张登良. CT 技术在土体结构性分析中的应用初探[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 62 - 66. (LI Xiao-jun, ZHANG Deng-liang. Application of CT in analysis of structure of compacted soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 62 - 66. (in Chinese))
- [9] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报, 2002(6): 106 - 112. (LU Zai-hua,

- CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. Study on damage evolution of natural expansive soil with computerized tomography during triaxial shear test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(6): 106 - 112. (in Chinese))
- [10] 孙 红, 葛修润, 牛富俊, 等. 上海粉质黏土的三轴 CT 实时细观试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(24): 4559 - 4564. (SUN Hong, GE Xiu-run, NIU Fu-jun, et al. Real-time CT meso-testing on Shanghai silty clay subjected to triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(24): 4559 - 4564. (in Chinese))
- [11] 吴紫汪, 马 巍, 蒲毅彬, 等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土, 1996, **18**(4): 306 - 311. (WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin, et al. Monitoring the change of structures in frozen soil in uniaxial creep process by CT[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(4): 306 - 311. (in Chinese))
- [12] 马 巍, 吴紫汪, 蒲毅彬, 等. 冻土三轴蠕变过程结构变化的 CT 动态检测[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(1): 52 - 57. (MA Wei, WU Zi-wang, PU Yi-bin, et al. Monitoring the change of structures in frozen soil in triaxial creep process by CT[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(1): 52 - 57. (in Chinese))
- [13] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的 CT 分析[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(3): 206 - 210. (LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. CT analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the Daban mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(3): 206 - 210. (in Chinese))
- [14] 凌贤长, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土动三轴试验 CT 检测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1244 - 1249. (LING Xian-zhang, XU Xue-yan, QIU Ming-guo, et al. Study on CT scanning of Harbin frozen silty clay. Before and after dynamic triaxial test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1244 - 1249. (in Chinese))
- [15] 孙星亮, 汪 稔, 胡明鉴. 冻土三轴剪切过程中细观损伤演化 CT 动态试验[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1298 - 1311. (SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. A CT -timely experimental study on meso-scope structural damage development of frozen soil under triaxial shearing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(8): 1298 - 1311. (in Chinese))
- [16] 刘增利, 张小鹏, 李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 543 - 546. (LIU Zeng-li, ZHANG Xiao-peng, LI Hong-sheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 543 - 546. (in Chinese))
- [17] 沈 为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. (SHEN Wei. Damage mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. (in Chinese))
- [18] LEMAITRE J. 损伤力学教程[M]. 倪金刚, 陶春虎, 译. 北京: 科学出版社, 1996. (LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. NI Jin-gang, TAO Chun-hu, translator. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [19] 张长庆, 苗天德, 王家澄, 等. 冻结黄土蠕变损伤的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊 1): 54 - 59. (ZHANG Chang-qing, MIAO Tian-de, WANG Jia-cheng, et al. An analysis on creep damage of frozen loess by electron-microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S1): 54 - 59. (in Chinese))
- [20] 马 巍, 吴紫汪. 围压作用下冻结砂土微结构变化的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(2): 152 - 158. (MA Wei, WU Zi-wang. Analysis of micro-structural changes in frozen sandy soil under confining pressure using scanning electronic microscope [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(2): 152 - 158. (in Chinese))
- [21] 赵淑萍, 马 巍, 郑剑锋, 等. 不同温度条件下冻结兰州黄土单轴试验的 CT 实时动态监测[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 92 - 97. (ZHAO Shu-ping, MA Wei, ZHENG Jian-feng, et al. CT real-time monitoring on frozen Lanzhou loess with different temperature under uniaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 92 - 97. (in Chinese))