

冻土蠕变变形特征的细观分析^{*}

吴紫汪 马 巍 蒲毅彬 常小晓
(中科院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 730000)

文 摘 通过观测分析冻土单轴及三轴蠕变过程中细观结构的变化情况, 发现蠕变过程中结构缺陷的增生与扩展制约着土结构的强化与弱化作用, 控制着蠕变变形形态特征。易破坏区首先发生在样品的低密薄弱层面的薄弱区, 对于单轴蠕变, 在薄弱层面形成一环状低密带, 然后向外扩展, 最终导致整体结构的破坏; 而对于三轴蠕变, 在样品薄弱段的表面形成拉伸裂缝, 然后向内扩展, 最终导致整体结构的破坏。在单轴蠕变过程中冻土的体积随时间的发展而持续增加; 三轴蠕变过程中冻土的体积随时间的发展而持续减小, 仅当进入第三蠕变阶段后其体积有相对增大的趋势, 但仍小于起始值。

关键词 冻土蠕变, 计算机断层 X 射线技术, 细观分析。

1 前 言

冻土作为寒区工程与人工冻结工程建设中的一种重要材料, 其变形特征的研究已日益受到重视。自 60 年代以来, 许多学者致力于这方面的研究, 已为工程实践提供了许多可靠的理论依据, 但是由于缺乏有效的测试手段, 对此问题的研究大都处在宏观的分析和理论的推测水平上。冻土作为一种多组分、分散相体系, 因受其中特有的冰胶结作用, 使其力学行为比其它介质更为复杂, 冻土内所发生的各组分配制关系与联结作用的变化决定着流变过程的宏观行为特征, 因此对其微观或细观结构的动态变化研究就显得更重要。

大家知道, 计算机断层 X 射线技术 (computerized tomography 简称 CT) 已成功地应用于医学界的人体检测, 并为材料的无损检测提供了新的手段。它不像普通的 X 射线投影那样将三维空间的图像投影到一个二维平面上, 使厚度方向的信息重叠在一起, 难以判断材料的每一层面上或者指定层面的信息, 而是以高分辨率的数字图像显示出来。如果再配制特殊可调控温度的三维高压非金属材料使之用于岩土与冻土成为可能。通过 CT 对冻土、冰和岩石的连续动态的试验观测以及对数据图像的定量分析, 此问题已得到初步解决^[1~5], 这一高技术不但可以无扰动、多方位对冻土或岩石在受荷与无荷条件下进行损伤检测, 而且可以通过 CT 图像与 CT 数值分析直观地、定量地将冻土或岩石的细观结构变化与其应力应变关系联系起来, 得到其它检测手段无法达到的效果。本文利用 CT 技术对冻土单轴及三轴蠕变过程细观结构的变化进行动态监测, 力求对冻土变形特征进行新的探讨分析。

2 CT 技术检测原理和试验准备

CT 是利用 X 射线穿透物体断面进行旋转扫描, 收集 X 射线经此层面不同物质衰减后的

* 国家自然科学基金 (批准号 49301006) 和冻土工程国家重点实验室资助项目。

信息, 进行放大和模数转换后由计算机对 CT 的探测空间范围内与空间某点 $P(x, y)$ 相关的各个方向射线进行空间解算, 得出与该点 X 射线吸收系数 μ 直接关联的 CT 值(H_p), 从而形成一幅物体断层的 μ 数字图像。CT 值(H_p)与 μ 的关系为

$$H_p = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \cdot 1000 \quad (1)$$

式中 μ_w 为水的 X 射线吸收系数。CT 的发明者 Housfield 教授定义: 空气的 CT 值为 -1000; 纯水为 0; 纯冰为 -100。

由式(1)可知, 求得 CT 数字图像中任一点的 CT 值后, 可以反算出该点的 μ 值, 而 μ 值与该点的干容重 γ_d 、含水量 w 和矿物成分组成等有关, 可用下式确定:

$$\mu = \gamma_d (\mu' + w) \quad (2)$$

式中 μ' 为土骨架的 X 线吸收系数, 通过试验得到兰州黄土 $\mu' = 1.2178$ 。但式(1)的应用具有很大的局限, 被测物体的几何形状、尺寸、位置、密度分布等都会造成图像数据的改变, 因此需针对具体问题修正^[1~3]。试验选用的是实验室专用的 GE8800 医用 CT, 它可在 5~10s 内完成一个断层的测量, 测量直径可达到 42cm。空间分辨率为 $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$, 密度对比分辨率为 0.5%。

为了消除金属对 CT 信号的干扰, 压力仓由非金属材料制成, 内径 150mm、外径 250mm, 外部高度 400mm、内部高度 220mm。最大轴压可达 30MPa, 最大围压可达 10MPa, 压力由液压系统供给。压力仓壁内及上下端头均安装有冷液循环系统, 由冷浴控制温度, 试验温度可在 $80^\circ\text{C} \sim -60^\circ\text{C}$ 之间变化, 温度精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

表 1 兰州黄土的物性指标

颗粒成分 (%)				比重	液限 (%)	塑限 (%)
> 0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	< 0.005			
1.7	5.4	58.6	34.0	2.7	24.6	17.7

试验选用兰州黄土, 其物性指标如表 1 所示。试样为圆柱状, 高 150mm、直径 61.8mm、含水量 $w = 25.88\%$ 、干容重 $\gamma_d = 1540 \text{ kg/m}^3$ 。试验条件为单轴无侧限压缩蠕变试验和轴对称三轴压缩蠕变试验, 对单轴试验其轴向荷载为 3.2MPa, 三轴试验其围压为 2MPa, 轴向荷载为 5.5MPa, 试验温度为 -5°C 。

将试样装于压力仓后在 -5°C 条件下恒温 12 小时以上方可进行试验。试验前先对样品进行一次预扫描(在试样上设计 3 个确定的扫描层位, 见图 1), 然后由 CT 动态监测这三个层面在不同蠕变阶段的变化情况, 直到试样破坏。

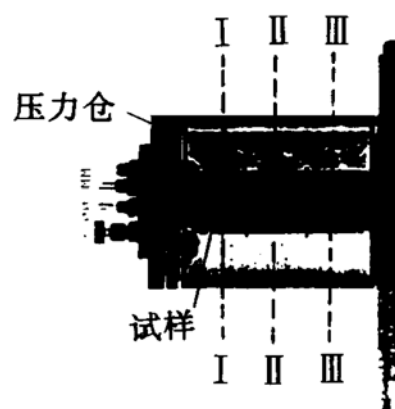


图 1 样品安装图
(I, II, III 为扫描层位)

3 动态监测结果分析

3.1 单轴蠕变试验结果

图 2 是 I 层面的 CT 扫描图像, 图中 a, b, c分别对应的是图 7(a) 中的 1, 2, 3 ...位置, 黑色为高密区, 白色为低密区。

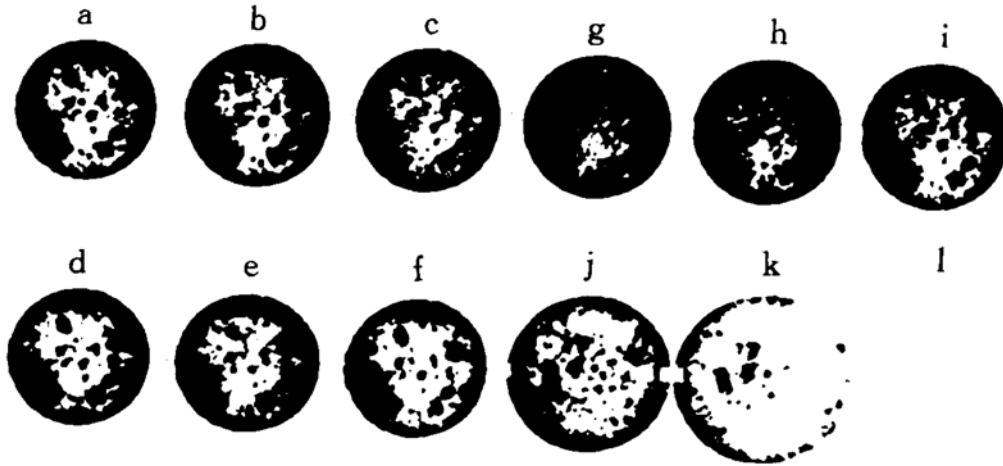


图2 I 层面的 CT 扫描图像

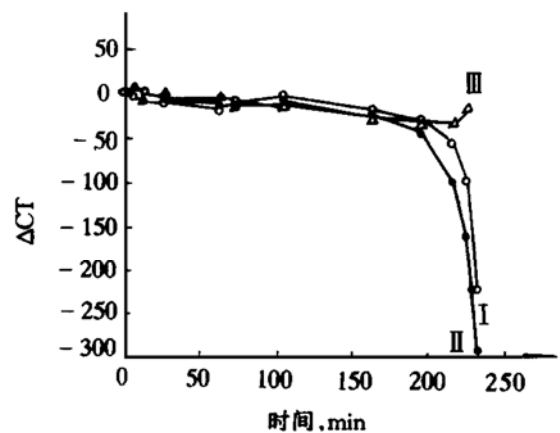
由试验前各层面的 CT 扫描图像可清楚地看到, 无论是不同层位还是同一层面的不同区域都呈现出样品内部结构的不均匀性, 高密区和低密区相间出现, 中心区域低密区相对集中, 见图 2 中 a。b, c 对应的为不稳定蠕变阶段的 CT 扫描图像, 虽然从 c 图像上来看个别低密斑点有增大的趋势, 但从整体来看各层面的高密区域均在增大, 这在 b 图像上反映得很明显, 这说明此阶段冻土主要呈压密状态。d, e, f 和 g 为各层面在稳定蠕变阶段的 CT 扫描图像, 可见到此阶段内高密区和低密区交替增大, 从整体层面来看, 由 d 到 f 低密区略有增大, 但到 g 高密区又有增大; 从局部单元来看, 中心区域的这种变化比边缘区域的变化更为明显, 但总的趋势是此阶段内冻土的结构变化处于动平衡状态。

当进入渐进流阶段后, 在变形曲线的 8, 9 位置处, 虽然各层面的高密区有所降低(见 h, j 图像), 但变化很缓慢, 这说明蠕变变形在超过最小变形速率点后冻土结构并未发生破坏, 我们所定义的最小变形速率点为冻土蠕变的破坏点, 事实上是偏保守的。当超过 9 位置后, 各层面的低密区明显增大(见 j, k 和 l 图像), 密度急剧降低, 夹杂在低密区中的高密斑点逐渐减小或消失。随着变形的发展, 各层面的低密区的贯通和融合, 逐渐在软弱层面形成一环状低密带, 也称为破碎带, 此破碎带的扩展速度趋于强烈增长, 最终导致整体结构的破坏。这一点从各层面的 CT 值的变化中可更清楚地看到(如图 3 所示)。

由此变化规律可认为在冻土单轴蠕变过程中存在着两个相互对立的现象——结构的弱化作用和强化作用, 这二者同步进行。在不同荷载作用下, 随时间的推移, 如果结构强化占优势, 则变形带有衰减特征; 如果结构弱化占主导, 则发展以破坏而告终的非衰减蠕变。

3.2 三轴蠕变试验结果

图 4 是 III 层面的 CT 扫描图像, 图中 a, b, c ... 分别对应的是图 7(b) 中的 1, 2, 3 ... 位置。由三轴蠕变试验的 CT 扫描结果可看到, 从不稳定蠕变阶段到稳定蠕变阶段(见图像 b, c, d, e 和 f), 各层面的高密区域均在扩大, 在个别区域高密斑点甚至有贯通汇合的趋势, 高密区的扩展

图3 全截面 ΔCT 值随时间的变化

使各层面的结构向均一化方向发展。当达到 f 图像, 即最小应变速率点 6 所对应的图像时, 各层面的密度均达到最大值, 但对不同的层面此最大值不一样, 愈靠近 III 层面的一端, 此最大值愈小。可见到这两阶段样品的径向变形很小, 也就是说由于围压的作用使冻土体在不稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段均产生压密现象, 这是与单轴压缩蠕变现象截然不同的。当进入渐进流阶段后(见图像 g, h 和 i), 样品开始出现径向变形, 愈靠近 III 层面一端, 此变形量愈大, 此时各层面密度迅速降低, 高密斑点减少或消失, 低密区扩展最终导致整体结构的破坏, 应注意到破坏首先发生在样品鼓胀最严重处, 在样品表面形成拉伸裂缝, 这也与单轴蠕变的破坏现象不一致。这一点从各层面的 CT 值的变化中可更清楚地看到(如图 5 所示)。

由此变化规律可认为在冻土三轴压缩蠕变过程中仍然存在着强化和弱化作用, 这二者同步进行, 围压的作用抑制了冻土体中裂隙的增长, 加强了结构的强化作用, 致使冻土体在不稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段表现出结构强化占优势。在不同荷载作用下, 随着非弹性变形的进一步累积, 如果结构强化仍然占优势, 则变形带有衰减特征; 如果弱化作用克服了围压效应占主导, 则发展以破坏而告终的非衰减蠕变。

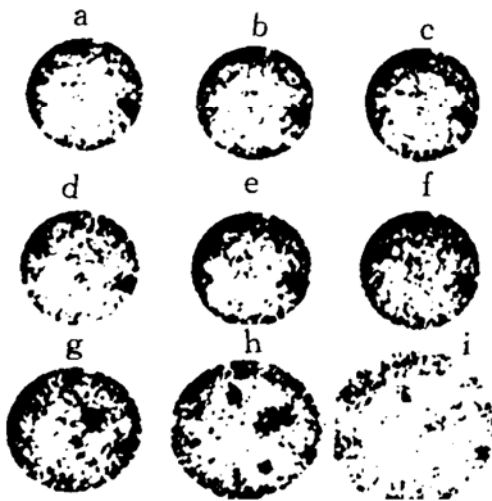


图 4 III 层面的 CT 扫描图像

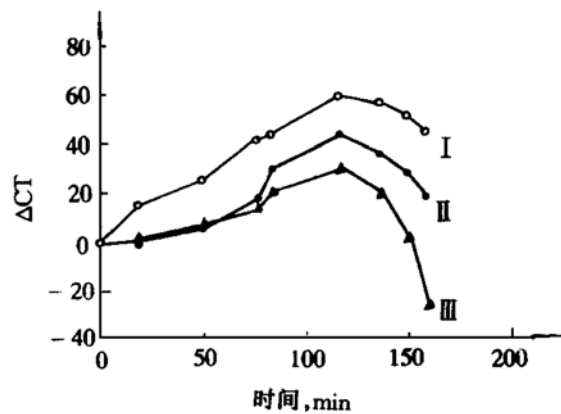


图 5 全截面 ΔCT 值随时间的变化

3.3 冻土蠕变过程中的体积变化

由上面的讨论可知, 无论是单轴或三轴受力情况, 土体的变形和破坏均首先从低密度薄弱部位发生, 而高密度部位变形很小。在蠕变过程中, 轴向压缩与侧向膨胀主要发生在不均匀接触面低密度最薄弱部位。从单轴和三轴蠕变过程比较来看, 单轴蠕变过程中各截面变形自受力开始就增大, 一直延续到试样破坏; 而三轴蠕变过程中各截面变形在第一蠕变阶段和第二蠕变阶段早期略有减小, 到后来才变为增大, 但增大的幅度较之单轴要小得多。从整体上看, 荷载的作用最终使单轴和三轴试样各层截面面积都有所增大(尽管增幅差异很大), 然而, 单轴荷载下各层位密度瞬间增加后持续减小, 所对应的平均 CT 值变化也一样(图 6(a)所示); 三轴受力情况下, 由于围压的作用, 试样的平均 CT 值持续增大直至进入第三蠕变阶段才突然降低, 而平均干容重持续增加直到试样破坏时才略有降低(图 6(b)所示)。

对比图 7(a) 和 (b) 可发现有无围压条件下土样的体积曲线呈截然相反的变化。由图 7(a) 可见, 单轴试验中初始受荷阶段其体积有短暂微量减小, 即硬化作用, 随后体积均匀持续增大, 当进入第三蠕变阶段后体积明显加速增大; 与之对应, 其土的密度(容重)持续减小。而三轴试验中(图 7(b))由于静水压力效应, 从受荷开始一直到破坏, 其体积持续减小, 即发生硬化作

用, 仅当进入第三蠕变阶段后其体积有相对增大的趋势, 但仍小于起始值, 此时仅在整体硬化作用下发生局部软化; 与之对应, 土的密度(容重)持续增大。这说明在冻土蠕变过程中体积的变化随受力过程的不同而不同, 此结果对冻土本构方程的建立及冻土变形的计算有相当重要的意义。

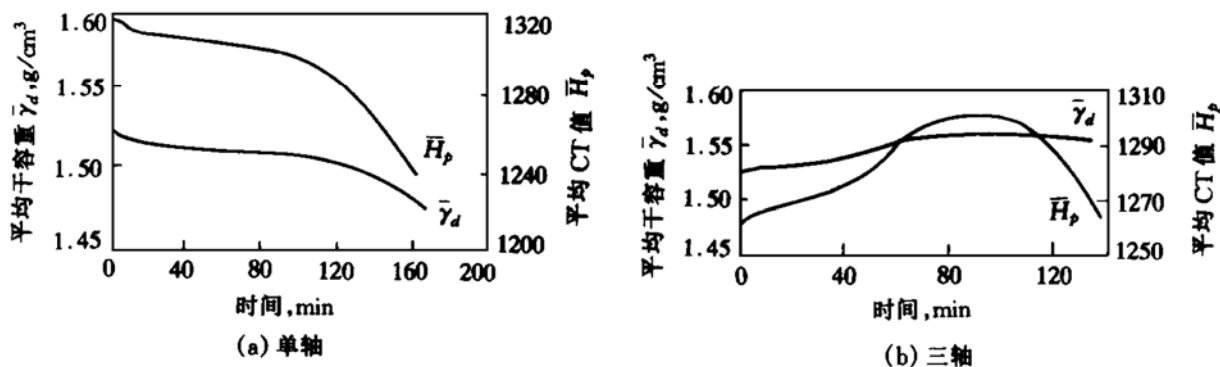


图6 冻土蠕变过程中试样平均干容重与CT值的变化

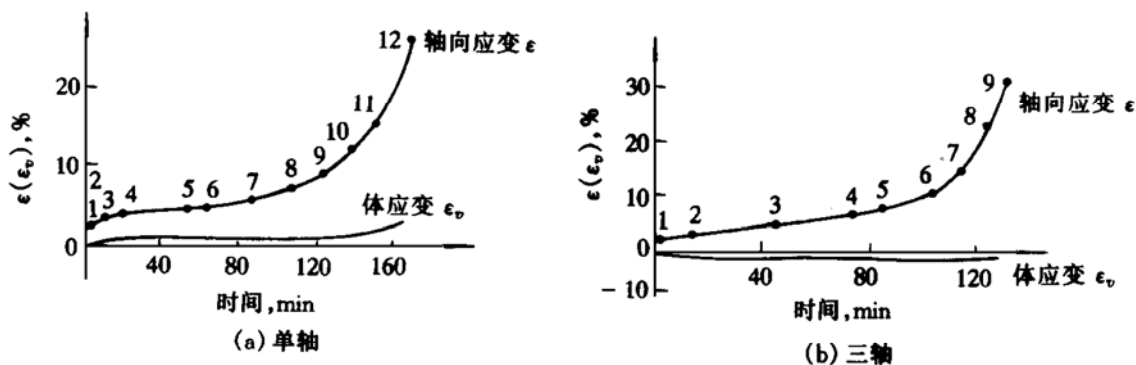


图7 冻土蠕变过程中蠕变曲线及体积变化曲线

4 结 论

(1) 在冻土变形过程中存在着两个相互对立的现象——结构的弱化作用和强化作用, 这二者同步进行。在不同的荷载作用下, 随着时间的推移, 如果结构强化占优势, 则变形带有衰减特征; 如果结构弱化占主导, 则发展以破坏而告终的非衰减蠕变。但是围压的作用可抑制冻土体中裂隙的增长, 加强了结构的强化作用, 致使冻土在不稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段表现出结构强化占优势。在不同的荷载作用下, 随着非弹性变形的进一步累积, 如果结构强化仍然占优势, 则变形带有衰减特征; 如果弱化作用克服了围压效应占主导, 则发展以破坏而告终的非衰减蠕变。

(2) 蠕变过程中高密区与低密区的交替进行以及其它结构缺陷的增生与扩展制约着土结构的强化与弱化作用, 控制着蠕变变形形态特征。易破坏区首先发生在样品的低密薄弱层面的薄弱区, 对于单轴蠕变, 在薄弱层面形成一环状低密带, 然后向外扩展, 最终导致整体结构的破坏; 对于三轴蠕变, 在样品薄弱段的表面形成拉伸裂缝, 然后向内扩展, 最终导致整体结构的破坏。

(3) 在单轴蠕变过程中各层位密度和CT值瞬间增加后持续减小, 冻土的体积随时间的发

展而持续增加; 三轴蠕变过程中试样的平均 CT 值持续增大直至进入第三蠕变阶段才突然降低, 平均干容重持续增加直到试样破坏时才略有降低, 冻土的体积随时间的发展而持续减小, 仅当进入第三蠕变阶段后其体积有相对增大的趋势, 但仍小于起始值。

参 考 文 献

- 1 蒲毅彬, 吴紫汪等. CT 在岩土实验中的数值分析. CT 理论与应用研究, 1994, **3**(3): 8~ 12.
- 2 吴紫汪, 马巍等. 冻土蠕变过程中结构的 CT 分析. CT 理论与应用研究, 1995, **4**(3): 31~ 44.
- 3 蒲毅彬, 吴紫汪等. 冻土 CT 实验的数学方程. 冰川冻土, 1995, 增刊: 135~ 139.
- 4 吴紫汪, 马巍等. 冻土蠕变过程中体积变化的 CT 分析. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊): 41~ 46.
- 5 Pu Yibin. The Introductory of Application Methods for CT in Frozen Soil Experimental Research. In: 6th Int Conf on Permafrost. 1993. 1208~ 1210.

Submicroscopic Analysis on Deformation Characteristics in Creep Process of Frozen Soil

Wu Ziwan Ma Wei Pu Yibin Cang Xiaoxiao

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, AS, 730000)

Abstract In this paper, computerized tomography (CT) is used to measure and analyze the change of submicrostructure of frozen soil in uniaxial and triaxial creep process. The study reveals that the strengthening and softening actions of structure, as well as the form characteristics of creep process in frozen soil are controlled by growing microcracks, and growing and extending structural damage in creep process. The broken structure was appeared firstly in weak area of low density layer of sample. In uniaxial creep process of frozen soil, a ringlike zone of low density was formed in weak layer of sample and then extended outward to result in failure of integral structure. And the volume of frozen soil increased continuously with time. In triaxial creep process of frozen soil, the tensile cracks was formed in surface of low density part of sample and then extended inward to result in failure of integral structure. Meanwhile, the volume of frozen soil decreased continuously and increased slightly at the third creep stage, but it was still smaller than the initial value.

Key words frozen soil creep, CT, submicroscopic analysis.