

冻土蠕变过程的微结构损伤行为 与变化特征

张长庆¹ 魏雪霞² 苗天德²

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 730000;

2 兰州大学力学系, 730000)

摘要 依据人工冻土的单轴蠕变试验资料和结构复型-电镜分析结果, 讨论了冻土蠕变过程的微结构损伤行为与变化特征。试验结果表明, 蠕变应力水平是控制损伤行为特征的决定性因素。研究结果是建立冻土损伤理论的前提和基础。

关键词 人工冻土 多晶冰 蠕变 微结构 损伤行为

1 概述

冻土作为一种多成分, 分散相颗粒集合体系, 因其特有的冰胶结作用和未冻水(汽)以及矿物颗粒骨架之间动力平衡状态随外载数量, 作用历时, 温度等条件制约, 导致其力学行为比其它松散介质更为复杂。冻土中所发生的各种成分配置关系与联结作用变化决定着整个流变过程的宏观行为特征。

70年代末期才建立起来的连续损伤力学(Continuum Damage Mechanics)(CDM)与断裂力学(Fracture Mechanics)(FM)同属破坏力学(Destroy Mechanics)范畴, 它研究微结构形成演化规律, 本构关系, 破坏机理, 被认为是一种研究耗散系统力学。物质之所以在一定环境下耗散能量是由于受到损伤并发生粘塑性流动(吴鸿遥, 1990)。由于损伤力学将结构损伤直至最终破坏作为一个完整全过程进行力学解析, 克服弥补了断裂力学的某些不足, 因而很快被应用于岩土力学研究领域。将“损伤”概念引入冻土力学研究, 始于 Вялов(1970)用“结构损伤度”和“定向度”评价结构变化, 主要借助光学显微镜手段, 仅限于单矿物高岭土。

我们在开展将现代损伤力学理论框架首次引入冻土力学领域的研究中, 系统开展了冻土蠕变试验与结构观测, 旨在探讨冻土流变过程中微结构变化规律, 以进一步建立冻土损伤理论。本文将反映这些试验的初步结果。

2 实验条件和方法

考虑到工程适用意义的广泛性, 实验土样采用兰州黄土, 其颗粒级配与稠度指标如表1所示。该土经粉碎, 重塑成型, 抽气饱和, 人工冻结。试样含水量 $W = 27\% \sim$

29%, 湿容重 $\gamma_w = 1.89 \sim 1.98 \text{ g/cm}^3$ 。

由表 1 可见, 该土粉粒组含量高达 58.6%, 其塑性指数 $I_p = 6.9$, 应定名为砂质粉土, 为典型的马兰黄土(张宗怙等, 1989)。

表 1 兰州(东岗)黄土的物性指标

Table 1 Physical index of Lanzhou loess

土名	粒级组成 (%)				土粒比重 Δ	液限 W_L (%)	塑限 W_P (%)
	粒 径 (mm)						
	>0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005			
兰州黄土	1.7	5.4	58.6	34.	2.7	24.6	17.7

实验条件为单轴无侧限蠕变试验。采用高 150 mm, 直径 61.8 mm 试样。试验加载设备用恒负荷蠕变试验机。土样温度控制精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。实验参数由高精度数采仪配合微机采集处理。

蠕变过程微结构观测采用结构痕迹复型-电子显微镜法。该法系在蠕变试验结束后立即将同一负温度下的有机玻璃($\text{C}_3\text{H}_5\text{CO}_2\text{CH}_3$)-三氯甲烷(CH_2Cl_3)溶液均匀涂于新鲜的土样受力(或破坏)面上。静置于原试验温度下恒温 48 h 以上, 清除硬化膜面上的土粒, 晾干即得结构痕迹复型膜片。此后再按电镜分析要求进行真空镀膜, 并在 EPM-810Q 型电子探针波谱扫描电镜上观测, 拍照, 以获得土样微结构图片^①。

3 试验结果与分析

3.1 冻结黄土蠕变试验

分别进行了 -5°C (剧烈相变区)和 -10°C (稳定相态)两组温度下的蠕变试验。蠕变应力 $\sigma_c = 0.73 \sim 2.48 \text{ MPa}$ (-5°C), $\sigma_c = 1.65 \sim 3.85 \text{ MPa}$ (-10°C) 分别为其破坏应力 σ_f 的 20%~70% ($\sigma_f = 3.54 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_f = 5.5 \text{ MPa}$)。获得的蠕变曲线簇如图 1、图 2 所示。

由图 1 可见, -5°C 的冻结黄土, 当 $\sigma_c = 0.2 \sigma_f = 0.73 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_c = 0.3 \sigma_f = 1.77 \text{ MPa}$ 时, 该两组土体分别在初应变 $\varepsilon_0 = 0.01$ 和 $\varepsilon_0 = 0.02$ 后迅即进入衰减蠕变阶段并保持稳定(变形不随时间发展), 直至试验终结(蠕变历时 $T_c = 24 \sim 36 \text{ h}$), 应变速率 $d\varepsilon/dt = 0$, 呈典型的衰减蠕变(该土长期强度极限与此蠕变应力值相近)。当 $\sigma_c = 0.65 \sigma_f = 2.30 \text{ MPa}$ 时, 土体在经历初始应变后转入非稳定流态, 至应变 $\varepsilon = 0.03$ 后进入稳定塑流状态 ($d\varepsilon/dt = \text{const}$), 保持约 22 h, 至应变 $\varepsilon = 0.07$ 时转入渐进流阶段, 应变速率迅速明显增大, 在近 2 h 应变量增加 0.04, 试样表面开始出现宏观裂纹并逐渐扩展, 直至 $\varepsilon = 0.11$ 时完全压溃, 破坏历时 $T_f = 30 \text{ h}$ 。当蠕变应力高达 2.48 MPa ($0.7 \sigma_f$) 时, 试样破坏历时仅 0.4 h。试样表面出现多条宏观裂纹。

-10°C 温度下的蠕变过程特征与 -5°C 的类似(图 2)。当 $\sigma_c = 2.75 \text{ MPa}$ ($0.5 \sigma_f$) 时, 变

^①电镜观测由中国科学院兰州沙漠研究所戴枫年高工完成。

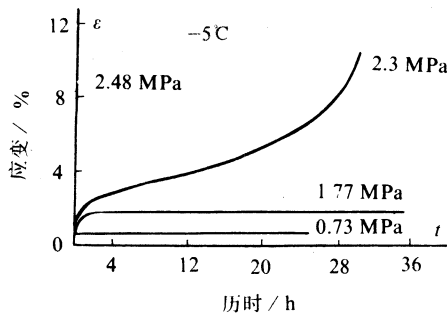


图 1 冻结黄土蠕变曲线(-5°C)

Fig.1 Creep curves of frozen loess (-5°C)

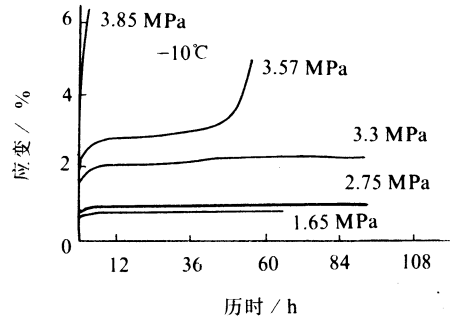


图 2 冻结黄土蠕变曲线(-10°C)

Fig.2 Creep curves of frozen loess (-10°C)

形具衰减特征, 而当 $\sigma_c = 3.75 \text{ MPa}$ ($0.66 \sigma_f$) 时, 表现出三阶段全程蠕变特征, 但出现渐进流的时间则比 -5°C 时延长近一倍。破坏应变 ε_f 却比 -5°C 时减少近一半 ($\varepsilon_f = 0.05$)。当 $\sigma_c = 3.85 \text{ MPa}$ ($0.7 \sigma_f$) 时, 破坏应变 $\varepsilon_f = 0.065$ 时, 试样即遭破坏。由于 -10°C 下土中胶结冰的晶格价键强化作用更强, 故其破坏应变比 -5°C 的减小约 50%, 破坏方式更具脆性特征。

上述蠕变试验结果, 为探讨其组构变化和在损伤力学研究中正确选择内变量提供了物理依据。

3.2 冻结黄土蠕变过程中的微结构变化

为获得试验黄土蠕变过程结构变化资料, 应用前述结构复型-电镜分析法开展了系列工作。包括对原状黄土(融土)和 -5°C 、 -10°C 未受载冻结黄土以及该二负温值下在不同蠕变应力条件 (-5°C 时 $\sigma_c = 0.7 \sim 2.48 \text{ MPa}$, -10°C 时 $\sigma_c = 1.1 \sim 3.85 \text{ MPa}$) 和不同蠕变历时(各个蠕变阶段)进行了结构复型。首次获得了冻结黄土蠕变过程微结构变化系列资料。

对比原状黄土与经重塑冻结后的微结构电镜图片(照片 1, 2)可见, 原状黄土微结构特点是矿物颗粒结合松散, 存在大量洞隙与管隙, 组构单元呈无序化分布。颗粒接触关系占优势的为点-点接触方式, 其次为棱-面接触, 而面-面接触方式仅占次要位置。究其原因与该土成因有关。因组成黄土的原生矿物主要为石英, 其次为长石、云母、角闪石。而其粘土矿物则以伊利石为最主要成分, 并由云母与蒙脱石构成无序化的片层结构(刘东生等, 1985)。与此同时, 试验黄土的粉粒含量高达 58.6%, 粘粒为 34.3% 以薄膜形式包裹粉粒形成松散排列结构(王永炎等, 1985; 黄文熙等, 1983)。而经重塑冻结后的黄土, 因原生结构遭破坏, 面-面接触和粗细颗粒镶嵌程度增加, 且有孔隙冰与未冻水膜形成参与, 使土团粒间的热电势平衡关系复杂化, 促使结构形态趋于复杂。

人工冻结黄土受载后的冷生组构与微结构形态, 不仅与温度、含冰量、密度有关, 更与荷载性质、加载方式, 特别与其承受的应力水平和作用历时关系密切。鉴于试验土样的密度和含水量大体相同, 故重点讨论应力水平对微结构的影响。

(1) 对比 -5°C 和 -10°C 的微结构图片(照片 3, 4)可见, 土温不一但均未受载时其结构形态相近。从颗粒单元完整性程度, 洞(管)隙和结构的无序排列状况看, 均无明显差异。

(2) 在低应力水平下($\sigma_c=0.7\text{ MPa}$, -5°C)(照片 5)变形为衰减型。土团结构排列与未受载时差异不明显。但土团之间洞隙与管隙等空洞现象趋于闭合。矿物颗粒结合程度趋于紧密。这表明此时结构强化占据优势, 土体变形主要由洞(管)隙的闭合和颗粒靠近(压密)造成。由于应力水平低($\sigma_c=0.2\sigma_f$), 在整个蠕变过程中将不大可能发生明显的结构再造作用。

(3) 当应力水平较高时($\sigma_c=0.6\sigma_f=3.3\text{ MPa}$, -10°C), 土体经历 86 h 后, 可见到矿物颗粒间的镶嵌程度明显增高, 部分土团和颗粒单元有一些糜棱化损伤和颗粒沿剪切面定向排列趋势(照片 6)。

(4) 当应力水平达 $\sigma_c=0.65\sigma_f$ (-5°C 时, $\sigma_c=2.3\text{ MPa}$; -10°C 时, $\sigma_c=3.57\text{ MPa}$)变形曲线可展现典型的三阶段全程蠕变(图 1, 2)。为探讨其各个变形阶段微结构的变化情况, 分别在各变形阶段终止试验, 取样复型结构进行电镜分析:

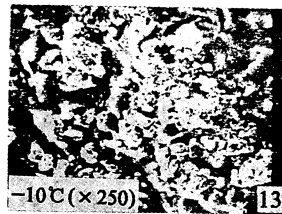
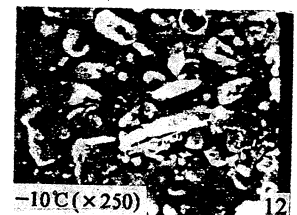
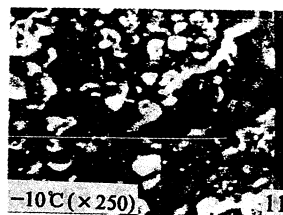
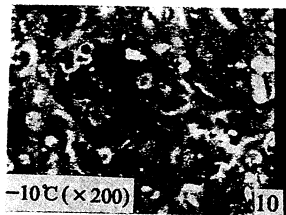
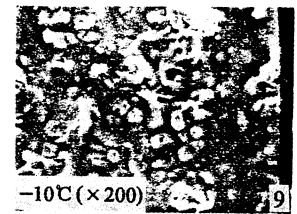
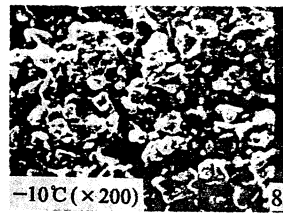
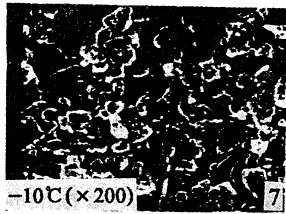
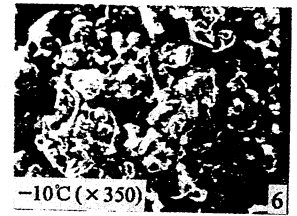
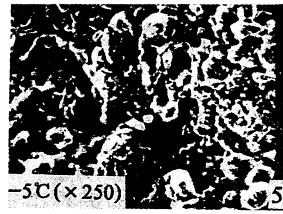
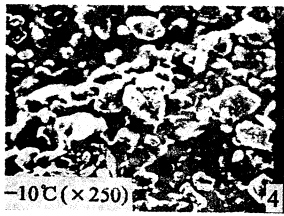
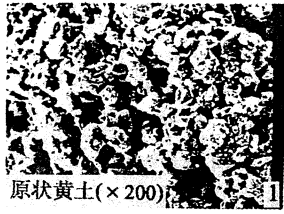
1) 土体在经历极短暂初始应变并克服弹性势障后开始进入塑性流动状态, 此时土团结构单元经历着结构最剧烈变化(迅速压密, 孔隙气体排逸, 洞穴体积减少), 随之趋于较稳定状态(变形速率由 $(d\varepsilon/dt)_{\max}$ 减小至 $(d\varepsilon/d\varepsilon)=\text{const}$), 此时微结构仍以矿物颗粒的无序化排列占主导地位, 结构损伤尚未开始, 颗粒形态完整(照片 7, 8)。

2) 当土体进入稳定塑流阶段(蠕变历时 36 h)土团在其原始缺陷基制周围和某些颗粒接触处(棱-面接触与点-点接触方式占优势)即内应力集中处, 开始萌生早期损伤的放射状微裂纹。同时土样冻结过程中产生的管(洞)隙与土团原生管(洞)隙, 随压密历时增加出现次生微裂纹。部分土颗粒沿剪切面方向重新定向, 损伤面积剧烈增大, 局部土粒“细化”, 显然对应的土颗粒面积损伤因子 $\omega=1-A_{\omega}/A_0$ (A_0 为土颗粒初始面积; A_{ω} 为土粒有效承载面积)和颗粒定向因子 $\Omega=1-A_0/A_n$ (A_n 为定向颗粒面积; A_0 应理解为与剪切方向垂直的面之面积), 将表征此过程结构损伤演变过程, 可正确反映土变形的实质。在此阶段中结构的强化和弱化作用处于动平衡态, 土体以常应变速率 $(d\varepsilon/dt)=\text{const}$ 进行塑性流动(照片 9, 10)。

3) 当土体由稳定流进入渐进流阶段后(蠕变历时达 50 h), 矿物颗粒沿剪切方向定向作用加剧, 粘土矿物基质与团粒相互镶嵌程度更甚, 并出现团簇状裂纹, 伴随裂纹的增生、扩展和局部贯通(照片 11, 12), 土的弱化作用开始占主导地位, 应变速率增大, 蠕变曲线上翘。

4) 土在经历上述短暂的渐进流动阶段后(蠕变总历时达 60 h), 占优势的弱化作用, 最终导致土团骨架崩溃、承载能力丧失, 而以破坏告终。从破坏后的复型-电镜照片明显可见土粒间剧烈错位的擦痕, 矿物颗粒边界不清晰。沟通的宏观裂纹痕迹隐约可见, 包裹在硬矿物周围的粘土矿物和部分孔隙冰似有剥落现象, 脆性矿物颗粒破碎为鳞片状物(照片 13)。

5) 如应力水平更高, 土破坏历时缩短, 但微结构形态仍与以上相近(照片 13)。



综上所述, 可归纳出如下几点认识:

(1) 冻土蠕变过程所发生的微结构损伤行为与土的成分组成, 原始构造, 含(水)冰

量、密度等因素关系密切, 而蠕变应力及其作用历时则决定了结构损伤行为的特征与规模。

(2) 冻土蠕变过程的结构损伤, 矿物颗粒定向状况, 微裂纹的萌生与扩展, 制约着土的强化与弱化作用, 控制着整个蠕变过程形态特征。

(3) 冻土蠕变实验及其结构复型-电镜分析结果, 为正确选择微结构损伤内变量, 进而建立冻土损伤理论提供了理论基础。

参 考 文 献

- 王永炎等. 1985. 中国黄土研究的新进展. 西安: 陕西人民出版社, 1~12.
刘东生等. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 356~362.
吴鸿遥. 1990. 损伤力学. 北京: 国防工业出版社, 4~15.
张宗枯等. 1989. 中国黄土. 北京: 地质出版社, 29~34.
黄文熙等. 1983. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 309~312, 353~358.
Вялов С. С. 1978. Реологический Основы МеханикаГрунтов. изд-во Высшая Школа, 347~361.

Microstructure Damage Behaviour and Change Characteristic in the Frozen Soil Creep Process

Zhang Changqing¹, Wei Xuexia² and Miao Tiande²

(1 *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, 730000;*

2 *Department of Mechanics, Lanzhou University, 730000*)

Abstract

Based on the data of artificial frozen soil and polycrystalline ice in uniaxial creep tests and the result of structure duplication electronmicroscope, this paper discussed the microstructure damage behaviour and change characteristic of frozen soil in the creep process. The test result showed that the creep stress level is a determinant factor of controlling damage behaviour. The study advanced the evidence for building the damage theory of frozen soil.

Key words: artificial frozen soil, polycrystalline ice, creep, microstructure, damage behaviour