

人工冻结软土的蠕变特性试验研究

钱宝源¹, 叶俊能², 陈忠¹, 刘干斌¹

(1. 宁波大学 地基处理中心, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通工程建设指挥部, 浙江 宁波 315012)

摘要: 结合宁波轨道交通中冻土蠕变的工程实例, 研究了人工冻结后土体物理力学性质的变化。在 -10°C 条件下, 对相关地层进行了不同应力水平的蠕变试验, 结果表明: 宁波地区人工冻土表现出了明显的蠕变特征, 是典型的蠕变材料。在加载水平较低时, ②₂₋₂和③₂土层的蠕变特性较其他各土层强。随着加载水平的提高, ③₁层含黏性土粉砂和③₂粉质黏土的应变随时间迅速增加, 土层蠕变特性显著衰减, 其他土层的蠕变特性随加载而增强。在试验基础上, 结合蠕变数学模型, 获得各土层的蠕变模型参数。此外, 宁波地区人工冻土的长期强度衰减很快, 随着时间的延长, 其衰减过程逐渐趋于平缓, 强度趋于稳定。

关键词: 轨道交通; 蠕变; 人工冻土

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2011)06-0494-05

Creep experiment of artificially frozen soft soil in Ningbo area

QIAN Bao-yuan¹, YE Jun-neng², CHEN Zhong¹, LIU Gan-bin¹

(1. Soil Improvement Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Urban Rail Transit Project Construction Headquarter, Ningbo 315010, China)

Abstract: To investigate the change of physical and mechanical property of the clay in Ningbo area after it is be artificially frozen, the creep experiment of the artificially frozen soft soil in Ningbo area, combined with the freezing engineering in Ningbo urban rail transit project, is executed for the layers of soil in condition of -10°C and different stress levels. The test results show that the artificially frozen soft soil in Ningbo is a typical creep material, the deformation characteristic of creep is obvious. When the loading level is low, creep behaviour for the soil layers ②₂₋₂ and ③₂ is stronger than others soil layer. With increase of loading level, the strain of ③₁ (silt with clay) and ③₂ (silty clay) is increase rapidly, the creep behaviour attenuated greatly, nevertheless, an opposite phenomenon occurs in other soil layers. Based on the test results, the parameters of the creep model for all layers of soil are presented. In addition, the long term strength of the artificially frozen soft soil in Ningbo area reduces quickly, with increase of time, the attenuation process tends to be mild and the strength reaches a stable value.

Key words: rail transit; creep; artificially frozen soil

收稿日期: 2011-04-27

基金项目: 宁波市自然科学基金项目(2010A610081); 宁波市重大科研攻关项目(2009C50004)

作者简介: 钱宝源(1966—), 男, 浙江省萧山人, 工程师, 硕士, 主要从事岩土工程技术研究。

蠕变是人工冻土的重要力学特征,人工冻土的蠕变会影响到冻结工程的长期稳定性。从 20 世纪 60 年代开始,维亚洛夫^[1]等人总结大量的试验成果,利用非线性蠕变理论,提出了冻土的流变学原理,并第一个提出了描述冻土蠕变全过程的经验本构模型。随后,国内外学者对冻土的蠕变开展了大量的试验研究,对冻土的蠕变特征有了深刻的认识,在此基础上,冻土的蠕变理论和本构模型方面的研究也得到了较大的发展。

人工冻土最显著的特点也是蠕变。在恒定应力条件下,人工冻土蠕变变形与时间关系曲线归纳起来可分为衰减型蠕变和非衰减型蠕变。实际工程中,加速蠕变阶段往往经历很短时间即可导致冻土结构物破坏。因此,对实际工程有研究意义的通常是初始蠕变阶段和等速蠕变阶段。为此,陈湘生^[2]阐述了中国人工冻结黏土蠕变的物理意义和特征,并将表征这些特征的试验数据进行分析,建立了相应的中国人工冻结黏土蠕变的数学模型,求出对应的蠕变参数。马巍等^[3]对天然冻土的蠕变变形特征进行了大量的研究,并取得了较多的成果。李栋伟等^[4]提出冻土黏弹本构模型,通过用户子程序嵌入到大型商业有限元软件 ADINA 中,最后用三轴蠕变试验检验了冻土黏弹本构模型。乾增珍等^[5]根据人工冻土蠕变特征和本构方程,引入经典弹塑性力学理论,将空间域和时间域进行离散化,提出了以时间增量法为基础的人工冻土有限元数值模拟计算公式应用 ANSYS 有限元程序。李栋伟等^[6]利用自行研制的 W3Z-200 型冻土三轴压缩蠕变仪,对淮南地区深表土冻土进行了三轴蠕变试验,耦合温度自由度,采用抛物线型屈服准则建立了新的本构模型来描述高围压复杂应力状态下冻土的蠕变变形特征。马小杰等^[7]为了研究高温-高含冰量冻土的蠕变特性,开展了温度分别为 -0.3 、 -0.5 、 -1.0 $^{\circ}\text{C}$,含水率分别为 40%、80%、120%的冻结黏土单轴压缩蠕变试验。

人工冻结后土体的物理力学性质发生显著变化,冻土蠕变引起过大的蠕变变形可导致冻结管断裂甚至引发更严重的安全事故。为了给人工冻结的设计和施工提供准确可靠的物理力学指标,确保冻结法施工过程的安全,了解和掌握人工冻土蠕变特性,预测冻结壁蠕变变形的大小将是设计的关键。为此,笔者结合位于宁波市轨道交通 1 号线旁通道冻结工程,对其冻结壁设计范围内主要土层进行蠕变试验研究,以为冻结工程的设计与施工提供参考依据。

1 人工冻土单轴压缩蠕变试验

对于冻土蠕变试验,试样的变形过程一般经历 3 个阶段:非稳定蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段。冻土在加速蠕变阶段产生的变形会超出允许变形值,会发生破坏。从安全的角度考虑,一般不允许冻土出现加速蠕变阶段。

1.1 蠕变试验装置

人工冻土单轴蠕变强度试验所用仪器为微机控制多功能冻土试验机,由低温箱、自动加载系统、数据采集仪等组成。做冻土单轴压缩蠕变试验时,施加在试件上的恒应力波动度不超过 0.5%。试验过程全部由计算机自动控制并自动进行数据采集,蠕变试验强度试验装置如图 1 所示。

1.2 蠕变试验方法

试验过程包括试样准备、加载、数据采集与成果分析 3 个主要过程。试样形状均为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体。对试样进行先固结,后冻结,达到试验温度后,在恒温条件下不少于 24 h,再进行冻土蠕变试验。

1.2.1 试样准备

对宁波轨道交通某区间钻孔取样,采用冻结原状土试样进行试验,每土层 5 个(多试样单轴蠕变试验),各土层的原状和人工冻土热物性参数如表 1 所示。



图 1 单轴蠕变强度试验系统

Fig. 1 Uniaxial creep strength testing system

表 1 原状土及人工冻土热物理指标

Table 1 Thermo-physical index of undisturbed soil and artificially frozen soil

土层 编号	土层名称	平均密度/ (g·cm ⁻³)	平均含 水率/%	平均冻结 温度/℃	冻土		原状土	
					比热容/ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比热容/ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]
② ₂₋₁	流塑淤泥	1.74	46.0	-0.11	2.09	1.86	2.41	1.08
② ₂₋₂	流塑淤泥质黏土	1.78	50.7	-0.21	2.10	1.65	2.41	1.13
③ ₁	稍密至中密粉砂、 含黏性土粉砂	2.03	27.4	-0.26	2.27	2.49	2.49	1.58
③ ₂	软塑至流塑粉质黏土	1.85	33.2	-0.43	2.19	1.76	2.36	1.34
④ ₁₋₂	软塑至流塑粉质黏土	1.91	37.9	-0.76	2.16	1.42	2.13	1.28
④ ₂	软塑黏土	1.79	42.5	-0.60	2.09	1.57	2.39	1.14

1.2.2 加 载

由于冻土的破坏形态:淤泥、淤泥质粉质黏土及流塑状态下的粉质黏土试件在-5、-10℃时大多呈腰鼓破坏形态,而在-15℃时大多呈剪切破坏形态;可塑状态的粉质黏土、黏土、粉砂试件在-5℃时大多呈腰鼓破坏形态,在-10、-15℃时大多呈剪切破坏。各土层在-5、-10、-15℃温度水平下冻土极限抗压强度如表2所示。

在进行蠕变试验时,各土层试样的加载分别取表2单轴极限抗压强度 σ_u 的0.3、0.4、0.5、0.6倍进行蠕变试验。按照确定合适的蠕变加载系数并根据瞬时单轴抗压强度计算出逐级加载所需荷载,在试样外套一层塑料膜,以防含水率变化,将试样装在单轴蠕变试验仪的上、下加压头之间,安装并连接好压力量测系统、位移量测系统。启动加载系统,给试样迅速加载至所需荷载或应力值,将此刻的变形值(弹性变形)进行记录,并随时记录时间、变形值。试验过程中试样所受应力宜保持恒定(其波动度不超过±10 kPa)。当试样变形已达稳定($d\epsilon/dt\leq 0.0005\text{ h}^{-1}$,Ⅰ类蠕变)24 h以上或趋于破坏(Ⅱ类蠕变)时,测试结束。卸去荷载,取出试样,描述其破坏情况。绘制各土层蠕变试验曲线,经过回归得到各土层的蠕变参数。

2 人工冻结软土蠕变试验结果分析

各土层在不同加载比条件下(定义加载比为 σ/σ_u ,其中 σ 为实际加载值, σ_u 为单轴极限抗压强度),冻土蠕变应变与时间之间的关系曲线如图2~7所示。其中横坐标为加载时间,纵坐标为试样应变值。从图2~7可以看出:宁波地区的人工冻土具有明显的蠕变特性,是典型的蠕变材料。在加载水平较低时,例如加载比取0.3时,②₂₋₂和③₂土层的蠕变特性较其他各土层强。随着加载水平的提高,各土层蠕变特性差异较大,③₁层黏性土粉砂和③₂粉质黏土的应变随时间迅速增加,土层蠕变特性呈衰减趋势,而其他土层的蠕变特性随应力的增加而更为明显。

由宁波地区人工冻土蠕变试验结果表明,在非稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段,即冻土发生破坏以前的变形过程的结果具有实际工程意义。现有研究表明:在考虑蠕变前两个阶段的变形时,人工冻土的蠕变过程可以用相关方程来进行描述,可表示如下:

$$\epsilon=A\sigma^Bt^C$$

(1)

式(1)中: ϵ —轴向应变,%; σ —轴向应力,MPa; t —时间,min; A 、 B 、 C 3个常数—与土质及温度有关的试验参数,可以通过回归分析确定。当蠕变应力较小时,试验曲线与回归拟合曲线吻合较好,而当蠕变应力较大时,两两曲线的偏差较大。

表 2 各土层冻土极限抗压强度 σ_u

Table 2 Ultimate compressive strength σ_u of different layers artificially frozen soil

层号	土层名称	极限抗压强度/MPa		
		-5℃	-10℃	-15℃
② ₂₋₁	淤泥	1.84	3.38	4.33
② ₂₋₂	淤泥质黏土	1.45	3.01	4.01
③ ₁	粉砂	2.07	3.89	6.03
③ ₂	粉质黏土夹粉砂	1.91	3.44	4.75
④ ₁₋₂	粉质黏土	1.63	2.35	3.44
④ ₂	黏土	1.54	2.78	3.87

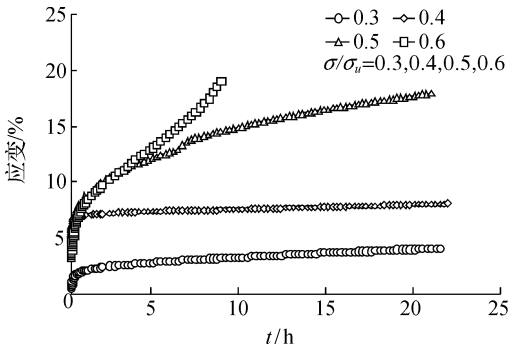


图 2 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下②₂₋₁土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 2 Curve of creep strength for ②₂₋₁ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

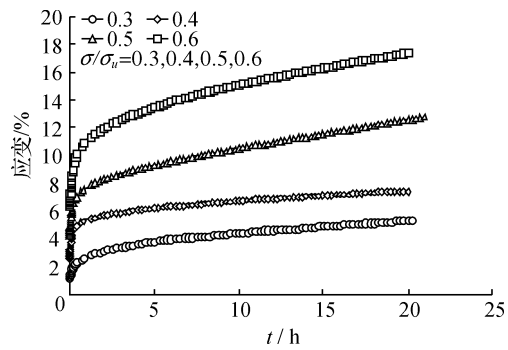


图 3 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下②₂₋₂土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 3 Curve of creep strength for ②₂₋₂ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

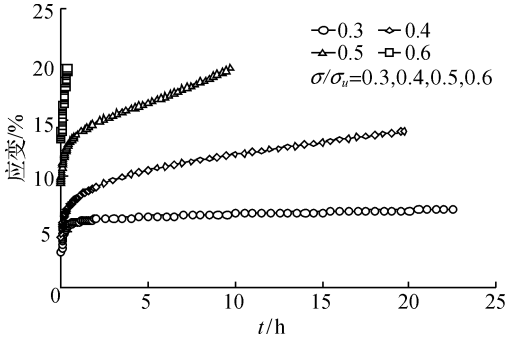


图 4 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下③₁土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 4 Curve of creep strength for ③₁ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

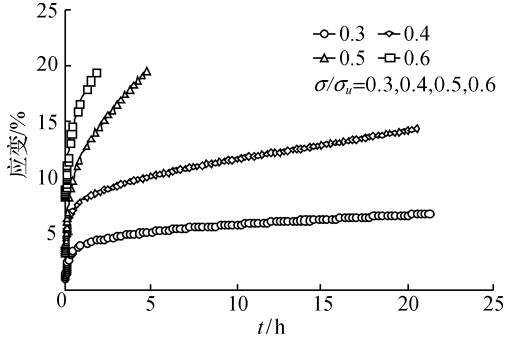


图 5 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下③₂土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 5 Curve of creep strength for ③₂ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

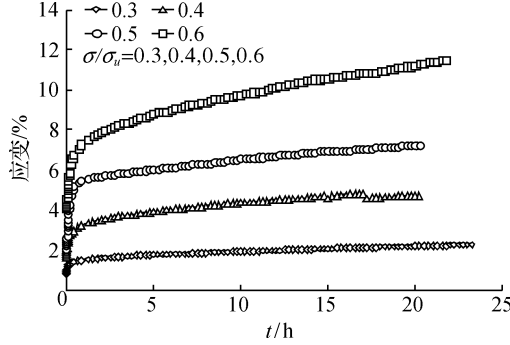


图 6 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下④₁₋₂土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 6 Curve of creep strength for ④₁₋₂ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

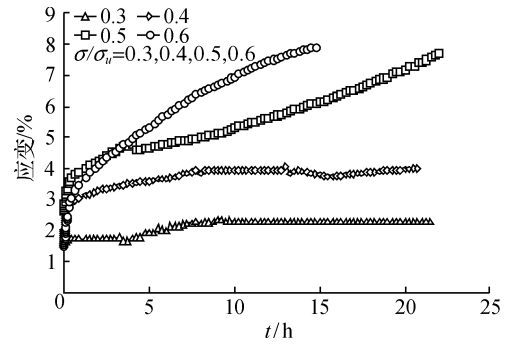


图 7 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下④₂土层冻土蠕变强度曲线
Fig. 7 Curve of creep strength for ④₂ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

根据各级荷载状态下土样应变随时间变化曲线,可建立相应的蠕变数学模型:

$$\epsilon_c = f(T, \sigma_i, t) \tag{2}$$

本次试验采用下列函数描述蠕变数学模型:

$$\epsilon_c = \epsilon_0 + A\sigma^B t^C \tag{3}$$

式(2)和式(3)中: T —试验温度, $^{\circ}\text{C}$; σ —轴向恒应力,MPa; t —蠕变时间,h; A 、 B 、 C —与试验温度、轴向恒应力、蠕变时间相关的参数。

从试验结果分析得出了各土层冻土在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的模型参数,试验结果表明各级荷载状态下各土层蠕变曲线基本符合常规试验结果规律,各土层冻土蠕变强度参数如表 3 所示。

3 宁波人工冻结软土的长期强度

由于冰和未冻水的存在,人工冻土的强度将随时间的延长而不断衰减,最后趋于稳定。由笔者开展的宁波地区人工冻土的蠕变试验可知:随加载应力的减小,人工冻土的破坏时间将逐渐延长,且冻土的强度也随时间的延长而降低。

由于长期强度是冻结设计和施工的重要参数,为此笔者根据蠕变试验建立的蠕变数学模型求其长期强度,根据相关经验可取破坏时的蠕变应变值 $\varepsilon=20\%$,代入相应的蠕变数学模型,以得出冻结灰色黏土在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时与时间相关的强度表达式。冻土的强度随时间衰减的过程可以用式(4)描述:

$$\sigma_t=A_0/t^d \tag{4}$$

式(4)中, σ_t —长期强度,MPa; A_0 —与破坏蠕变应变值和试验温度有关的试验拟合系数; T —承载时间, $t\neq 0,\text{h}$; d —强度衰减试验拟合系数。

本研究仅对②₂₋₁和③₁土层的长期强度进行拟合,②₂₋₁土层的拟合参数 $A_0=0.7564,d=0.1139$;③₁土层的拟合参数 $A_0=0.6111,d=0.1018$ 。拟合结果如图8和9所示。由冻土的长期强度变化规律拟合结果(图8和图9)可知,在加载应力初期,人工冻土的强度衰减很快。随着时间的延长,长期强度衰减曲线将逐渐趋于平缓。在工程实践中,由于隧道的开挖与支护一般有一定的时间差,在该时间差内,冻土的强度将会出现大幅度降低。因此,在人工冻结工程的设计和施工中,需要特别注意人工冻土的长期强度,不能用瞬时强度来代替长期强度进行设计,且在施工过程中要注意减小开挖与支护的时间间隔,确保冻土强度和工程稳定性。

4 结 语

本研究结合位于宁波市轨道交通1号线旁通道冻结工程,对其冻结壁设计范围内主要土层进行蠕变试验研究,分析了不同加载条件下各土层的蠕变特性,并利用数学模型对各土层的蠕变曲线进行拟合,得到了相关地层的蠕变模型参数。试验分析结果进一步表明:在加载应力作用初期,冻土的强度衰减很快,但随着时间的延长逐渐趋于平缓。在冻结法施工过程中,冻土的强度会随时间而大幅降低。因此,在人工冻结工程的设计过程中,必须考虑冻土的长期强度,不能用瞬时强度替代长期强度进行设计。

参考文献:

[1] 维亚洛夫. 土力学的流变原理[M]. 杜余培,译. 北京:科学出版社,1987.
[2] 陈湘生. 我国人工冻结粘土蠕变数学模型及应用[J]. 煤炭学报,1995,20(4):399-402.
[3] 马巍,朱元林,马文婷,等. 冻结粘性土的变形分析[J]. 冰川冻土,2000,12(1):43-47.
[4] 李栋伟,汪仁和,胡璞,等. 人工冻土粘弹性本构关系研究[J]. 低温建筑技术,2005(4):73-74.
[5] 乾增珍,鲁先龙,陈湘生. 人工冻土蠕变的数值计算及其模拟[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(3):39-42.
[6] 李栋伟,汪仁和,赵颜辉,等. 抛物线型屈服面人工冻土蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1943-1948.
[7] 马小杰,张建明,郑波,等. 高温-高含冰量冻土蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(6):848-852.

表 3 各土层冻土蠕变参数

Table 3 Creep parameters for layers of artificially frozen soil

层号	土层名称	蠕变参数		
		A	B	C
② ₂₋₁	流塑淤泥	0.684	1.982	0.172
② ₂₋₂	流塑淤泥质黏土	0.521	1.560	0.298
③ ₁	稍密至中密粉砂、 含黏性土粉砂	0.407	1.637	0.317
③ ₂	软塑至流塑粉质黏土	0.413	2.399	0.363
④ ₁₋₂	软塑至流塑粉质黏土	1.172	1.881	0.096
④ ₂	软塑黏土	0.021	2.730	0.394

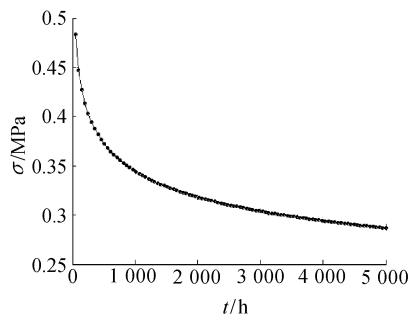


图 8 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下②₂₋₁土层冻土长期强度
Fig. 8 Long term strength of ②₂₋₁ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

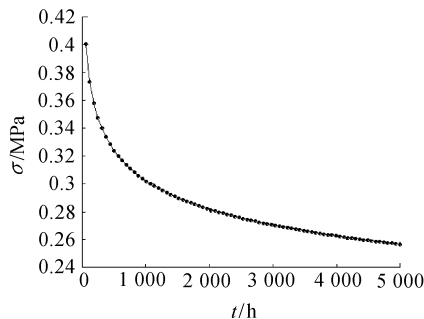


图 9 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下③₁土层冻土长期强度
Fig. 9 Long term strength of ③₁ layer of artificially frozen soil at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$