

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0057

YANG Suiqiao, WANG Ningning, ZHANG Hu. Study on creep test and creep model of warm frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):834-842. [杨岁桥, 王宁宁, 张虎. 高温冻土的蠕变特性试验及蠕变模型研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):834-842.]

## 高温冻土的蠕变特性试验及蠕变模型研究

杨岁桥<sup>1,3</sup>, 王宁宁<sup>2</sup>, 张 虎<sup>3</sup>

(1. 甘肃省有色金属地质调查局 兰州矿产勘查院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了研究高温冻土蠕变变形特征以及各影响因素对蠕变的作用, 分别在含水量 15%、25% 及 35%, 荷载 100 kPa、200 kPa 及 300 kPa, 温度 -1.5 °C、-0.7 °C 及 -0.3 °C 的条件下开展了室内单轴蠕变试验, 分析在无侧限条件下高温冻土在不同温度、荷载及含冰量条件下的蠕变变形特性。结果表明: 在当前试验条件下, 冻土蠕变变形非常可观, 且蠕变曲线都没有出现渐进流阶段; 温度是影响冻土蠕变的最重要的外在因素, 而含冰量是影响冻土蠕变的关键内在因素; 在高含冰量条件下温度及荷载的改变对蠕变速率的影响非常显著, 甚至引起量级上的差别。在现有试验条件下, 高温冻土蠕变过程可利用 Burgers 黏弹性模型来较好地描述。

**关键词:** 高温冻土; 蠕变特性; 衰减蠕变; Burgers 黏弹性模型

**中图分类号:** TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0834-09

### 0 引言

随着我国对高纬度和高海拔冻土地地区的开发和建设, 多年冻土的存在致使很多工程问题或病害产生, 而其中诸多问题与冻土蠕变特性有密切关系<sup>[1-4]</sup>。因此, 深入研究冻土的蠕变特性对实际工程中有十分重要的意义。

国内外许多学者针对冻土蠕变已经开展了很多研究。维亚洛夫<sup>[5]</sup>、马巍等<sup>[6]</sup>、吴紫汪等<sup>[7]</sup>进行了冻土单轴蠕变过程中微结构变化的观测并得出结论: 蠕变的发生发展是受荷载作用下冻土发育微裂隙、颗粒集合体的破坏以及其它结构缺陷的增生所控制的。朱元林等<sup>[8-9]</sup>曾系统地开展了室内侧限压缩试验研究, 结果表明: 无论是对冻结黏性土还是冻结砂土, 压缩系数随温度的变化在“高温”区间(如高于 -1.0 °C)变化非常剧烈, 负温的微小变化也会引起压缩系数的大幅度变化。当负温较高和含冰量较大时, 冻土变形稳定时间通常长达数十天甚至数月, 这是由于冻土试样中存在大量的未冻

水, 在土体受压过程中未冻水发生着缓慢的相变、迁移、渗滤和重结晶作用。McRobert<sup>[10]</sup>通过试验分析了在 -0.8 ~ -4.0 °C 区间高含冰量冻土的稳定蠕变速率, 发现当温度较高时高含冰量冻土的蠕变速率要大一些, 而无论温度高低, 蠕变方程都可以写成  $\dot{\epsilon}=A\sigma^n/(1-T)^m$  的形式。马小杰等<sup>[11]</sup>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 °C、-0.5 °C、-1.0 °C, 含水率分别为 40%、80%、120% 的冻结黏土的单轴压缩蠕变试验, 试验结果表明, 无论应力多大、作用时间多长, 高温-高含冰量冻结黏土单轴压缩蠕变过程都具有衰减特征。为了使试验条件更加符合气候变暖下冻土的变形条件, 郑波等<sup>[12]</sup>在室内开展了高温-高含冰量冻土的恒载升温试验研究, 试验发现: 在较高温度下冻土的压缩量要比较低温度时大得多, 温度是影响高温-高含冰量冻土压缩系数的主要因素, 在高温区间内, 压缩系数随温度的升高显著增大。Liu 等<sup>[13]</sup>进行了室内恒温变载侧限压缩试验, 发现冻结

收稿日期: 2020-04-26; 修订日期: 2020-08-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高温冻土动力软化变形特性及孔压和微结构响应”(41971085)资助

作者简介: 杨岁桥(1986-), 女, 陕西咸阳人, 工程师, 2012年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 从事GIS在防灾减灾方面的应用研究. E-mail: yangsuiqiao@live.cn

通信作者: 张虎, 副研究员, 从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: zhanghu@lzb.ac.cn.

黏土的压缩指数随着温度的升高而增大, 与温度之间呈现指数关系, 高含冰量冻土在高温区间的压缩指数均大于 0.15, 可认为是高压缩性土。高温冻土受压时存在着孔隙水压力的升高与消散, 说明了在其体积压缩变形过程中存在着固结变形<sup>[14]</sup>, 而采用土壤改良方法改善高温冻土蠕变性质被认为是有效的<sup>[15]</sup>。上述研究都较好地揭示出了冻土的蠕变性质, 但对在各种影响因素下冻土的蠕变性质研究仍然不足。

本研究以青藏高原多年冻土区路基工程下高温冻土为对象, 通过开展室内单轴蠕变试验探究在高温区间冻土蠕变变形特性及与各影响因素之间的关系, 并明确适合描述冻土蠕变变形过程的蠕变模型, 为工程建设地基变形评价提供参考。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 试验装置及土样准备

单轴蠕变试验是依托中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室来开展的, 采用了配有低温恒温箱的万能材料试验机, 如图 1。试验机最大加载力 10 t, 荷载控制精度 5 N, 位移传感器精度 0.01 mm, 恒温箱控温精度  $\pm 0.1$  °C。



图 1 万能材料试验机

Fig. 1 Photo of the universal material testing machine

单轴试样采用了青藏粉质黏土制成, 其粒径分布如图 2 所示。试样是在常温下制作完成: 将一定

质量的干土以及去离子水搅拌均匀后压制而成。试样尺寸  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。根据该土质的塑限含水量 (18.1%) 及液限含水量 (29.6%), 试验含水量分为 3 种: 15%、25% 及 35% (图 3), 土样密度见表 1。

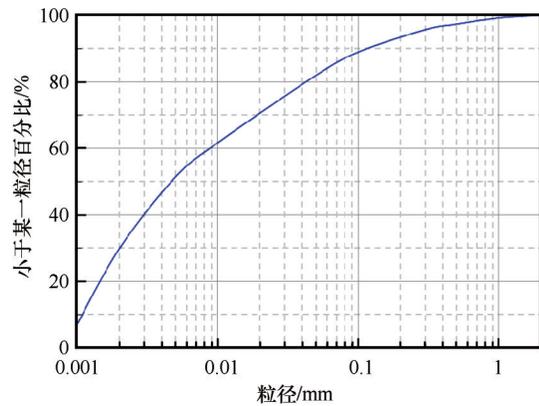


图 2 试样土质粒径分布

Fig. 2 Soil particle size distribution



图 3 蠕变试样照片

Fig. 3 Photo of the specimens

表 1 试样物理参数

Table 1 Physical parameters of the specimens

含水量/%	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
15	2.15	1.87
25	1.98	1.58
35	1.83	1.36

### 1.2 试验操作

试验前, 首先将制作完成的土样放进恒温箱内 24 h 将土温恒定至试验所需温度; 然后快速施加荷载, 之后保持荷载 48 h (由于荷载较小, 土样变形非常缓慢, 短时间无法达到土工规范规定的稳定标准: 应变达到 0.2, 因此统一将稳定时间定为 48 h)。试验荷载分为 3 类: 100 kPa, 200 kPa 及 300 kPa,

荷载水平较低,主要是根据路基基地压力来确定(5 m高路基基地压力约100 kPa)。试验选择3种温度:  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研究对象是高温冻土,对青藏粉质黏土,高温冻土区间一般可取为 $-1.5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 蠕变试验结果分析

### 2.1 不同温度条件下蠕变变形分析

图4表示的是100 kPa压力下3种含水量土样在不同温度条件下的蠕变曲线。整体来看,冻土蠕变速率表现出随着温度升高而增大的特点,而且随着含水量的增加速率增加速度加快。

在含水量较低的情况下( $W=15\%$ ),冻土变形量主要是由瞬时弹性变形来构成,蠕变变形占据较小比例(占比10%~30%)。温度升高主要改变了弹性变形,而对蠕变变形影响较小:在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下总应变为0.0097,蠕变应变占20%;在 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下总应变为0.014,蠕变应变占28%[图4(a)]。随含水量增大,蠕变在总变形中逐渐占据主导,而温度的升高加速了蠕变的发展。在35%含水量时, $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 总应变为0.02,蠕变应变占37%; $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两者分别为0.075和87%[图4(c)]。

高温区间内,温度升高显著地提高了冻土变形能力,尤其是高含冰量条件下。虽然100 kPa(相当于5 m路基高度下基底附加应力)压力并不太大,也会引起青藏高原多年冻土区高含冰量路段在长期发展过程中产生非常可观的沉降变形。无论温度高低,变形曲线只经历三个阶段:瞬时弹性变形、初始蠕变阶段及稳定蠕变阶段。在较低温度下,稳定蠕变曲线以近似直线逐渐发展;而在较高温度条件下,稳定蠕变速率其实在逐渐减小,呈现缓慢的衰减状态。

### 2.2 不同含水量条件下蠕变变形分析

图5表示的是200 kPa压力下分别在3种温度环境下不同含水量条件下的蠕变曲线。整体来看,冻土蠕变速率表现出随着含水量升高而增大的特点,而且随着温度升高高含冰量冻土变形能力得到极大地增加。

含冰量较低时,即使荷载有所增大,温度改变对总变形量影响较小,且变形量以瞬时弹性变量为主,蠕变变形较小;含冰量的提高迅速提高了冻土的变形能力,不仅蠕变变形量在总变形中所占比例增大,而且对温度改变的敏感性迅速提升。

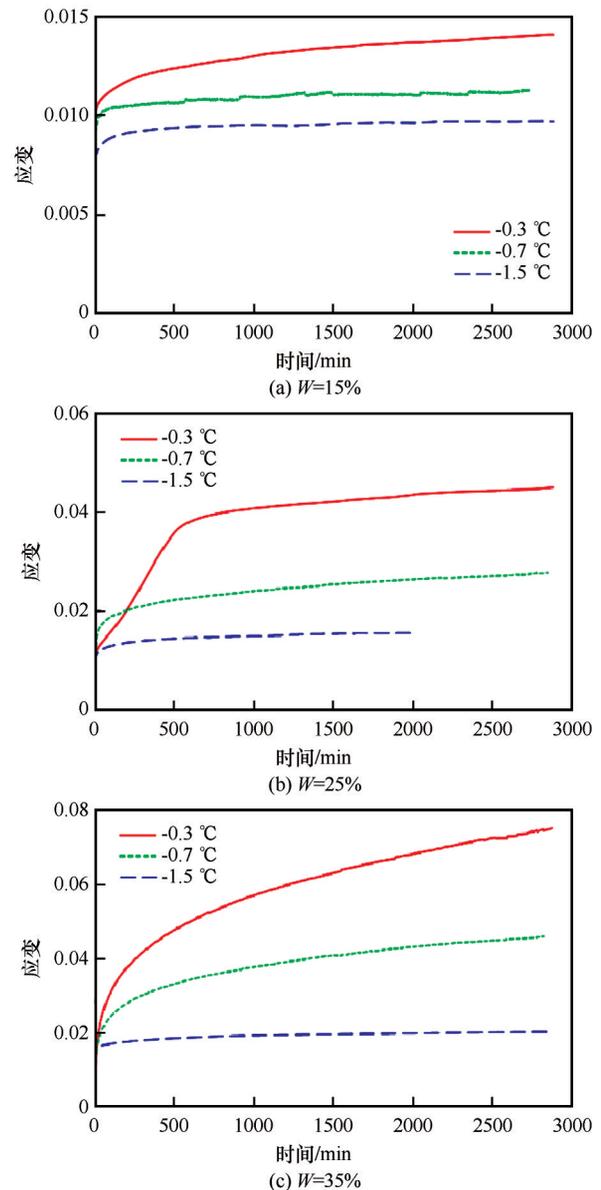


图4 不同温度条件下蠕变曲线(100 kPa)

Fig. 4 Creep curves of specimens (100 kPa) at  $-0.3$ ,  $-0.7$  and  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  when  $W=15\%$  (a),  $25\%$  (b) and  $35\%$  (c)

在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,含冰量15%土样总应变0.016,蠕变变形量占20%;含冰量35%土样总应变0.038,蠕变变形量占64%。在 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,含冰量15%土样总应变0.022,蠕变变形量占15%;含冰量35%土样总应变0.183,蠕变变形量占95%。

含冰量的改变没有改变冻土蠕变曲线形态,依然没有出现渐进流阶段。在含冰量较低时,蠕变曲线基本没有明显的初始蠕变阶段,稳定蠕变段更接近于直线;随着含冰量的增加,初始蠕变阶段更加明显,稳定蠕变速率在逐渐减小,即逐渐衰减。

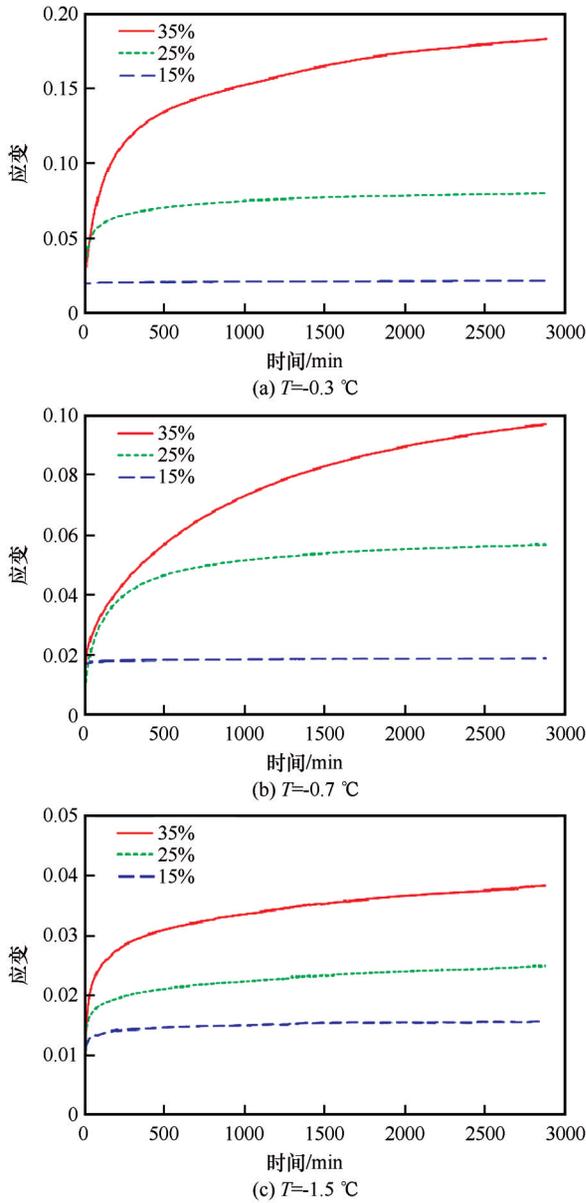


图5 不同含水量条件下蠕变曲线(200 kPa)  
Fig. 5 Creep curves of specimens (200 kPa) under water contents of  $W=15\%$ ,  $25\%$  and  $35\%$  at  $T=-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (a),  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b) and  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)

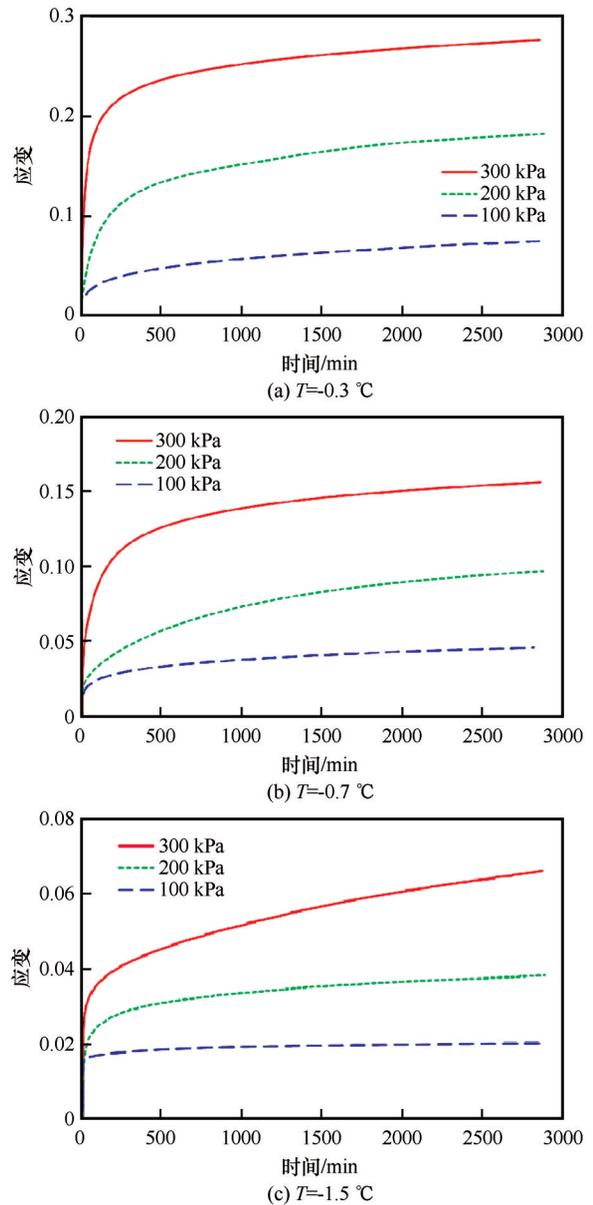


图6 不同荷载条件下蠕变曲线( $W=35\%$ )  
Fig. 6 Creep curves of specimens ( $W=35\%$ ) under loading of 300, 200 and 100 kPa when  $T=-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (a),  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b) and  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)

### 2.3 不同荷载条件下蠕变变形分析

图6表示的是35%含冰量下分别在3种温度环境下不同荷载条件下的蠕变曲线。整体来看,冻土蠕变速率表现出随着荷载增大而增大的特点,而且随着温度升高冻土变形能力得到极大地增加。

不同等级荷载的施加基本会使冻土变形成倍增加,温度的升高对总变形量也有着显著影响。在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,100 kPa下土样总应变0.02,蠕变变形量占50%;300 kPa下土样总应变0.066,蠕变变形量占82%。在 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,100 kPa下土样总应变

0.075,蠕变变形量占86%;300 kPa下土样总应变0.277,蠕变变形量占95%。

荷载的改变依然没有改变冻土蠕变曲线形态,没有出现渐进流阶段。在不同荷载下,冻土蠕变曲线都出现了较为明显的初始蠕变阶段,温度越低初始蠕变阶段越短。

### 3 冻土蠕变与影响因素的关系

冻土变形性质受到温度、含冰量、荷载等因素的综合影响。无论在何种条件下,冻土蠕变曲线只

存在3个阶段：瞬时弹性变形、初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段。

从图4~6可以看出，温度、含冰量及荷载对冻土蠕变性质有着很大的影响。温度越高，含水量越大，荷载越大，冻土的力学性质越不稳定，蠕变变形量越大，稳定蠕变速率也越大。温度越低、含冰量越小，荷载越小，在稳定蠕变阶段蠕变曲线越接近于一条直线；随着温度升高、含冰量增大及荷载的增大，稳定蠕变阶段变形速率的变化也增大。但无论这几种条件怎么变化，蠕变曲线都没有出现渐进流阶段。

图7表示不同荷载及含冰量条件下稳定蠕变速率与温度之间的关系。总体来说，在较低含水量条件下，冻土稳定蠕变速率较小，即使温度以及荷载的大幅改变也没有引起其明显的变化。但是随着含水量的增大尤其是在高含水量条件下，温度及荷载的改变对稳定蠕变速率的影响越来越显著，甚至能引起其量级上的变化。

不同因素对冻土变形性质的作用程度不同。表2表示的是从试验结果中插值计算出的在高温条件下液、塑限含水量时冻土应变值，以及在液限含水量条件下高、低温时冻土应变值。在 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下，塑限含水量土样与液限含水量土样的应变值差值在各压力下分别为0.03、0.08、0.125；在液限含水量条件下，低温与高温土样的应变值差值在各压力下分别为0.042、0.098、0.163。可以看出，相

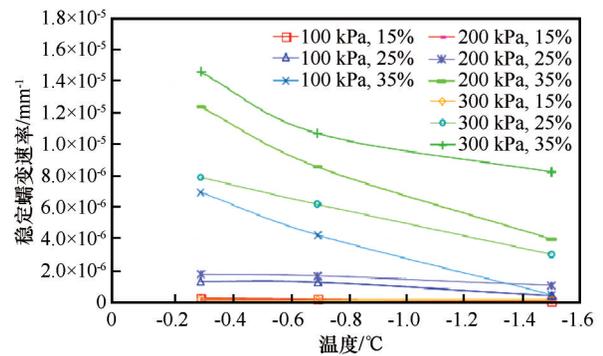


图7 各试验稳定蠕变速率

Fig. 7 Steady creep rates under various load and ice content changing with temperature

同压力下，冻土蠕变对高温区间内温度改变(液限含水量条件)的敏感性大于对液塑限区间含水量改变(高负温条件)的敏感性。另一方面讲，路基下多年冻土含冰量短期内基本不发生变化，但是地温却是随着气温的波动而在实时变化，从而实时改变冻土内冰-未冻水的比例，改变冻土内胶结程度，更容易影响冻土的力学性质。因此温度是影响冻土蠕变的最重要的外在因素，而含冰量是重要的内在影响因素。荷载虽然对冻土变形性质也有着很大影响，但是路基下部所承受的荷载主要是路基本体的自重，一般不会发生大的变化，并且荷载在向下传递的过程中很快衰减，另外荷载是外部因素不会改变冻土内部物理力学性质，因此荷载对冻土的变形性质的影响作用最次。

表2 高温及高含冰量条件下冻土应变值

Table 2 The frozen soil strains at  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and at liquid limit water content changing with load calculated from the experimental results

压力/kPa	$-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻土应变		液限含水量冻土应变	
	塑限含水量(18.1%)	液限含水量(29.6%)	低温( $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	高温( $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
100	0.030	0.060	0.018	0.060
200	0.050	0.130	0.032	0.130
300	0.090	0.215	0.052	0.215

#### 4 蠕变模型

冻土蠕变力学模型的数学表达式有多种形式，如经验方程法、遗传蠕变法和流变模型法等。流变模型法是通过一些基本元件(弹簧、黏壶、摩擦片)组合来构建力学模型，具有比较直观、物理意义明确等优点，广大工程技术人员也经常采用。在简单性及精确性两个标准的基础上，本文选用流变模型法来对试验结果进行拟合分析。研究发

现，当应力较小时 Burgers 黏弹性模型是能描述高温-高含冰量冻土蠕变曲线的最优模型<sup>[16]</sup>。该模型参数较少且每个参数都具有明确的物理意义，表达式如下：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \quad (1)$$

式中： $\varepsilon$ 表示总应变； $\sigma$ 表示应力； $E_1$ 表示初始弹性模量； $E_2$ 表示初始蠕变阶段的渐进弹性模量； $\eta_1$ 表

示稳定蠕变阶段的黏滞系数;  $\eta_2$  表示初始蠕变阶段的黏滞系数。模型力学元件组成如图 8 所示。

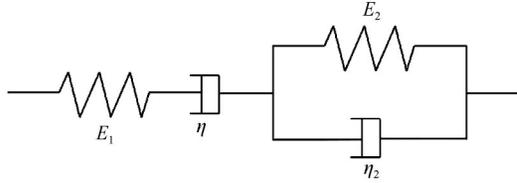


图 8 Burgers 黏弹性模型示意图  
Fig. 8 Burgers viscoelastic model diagram

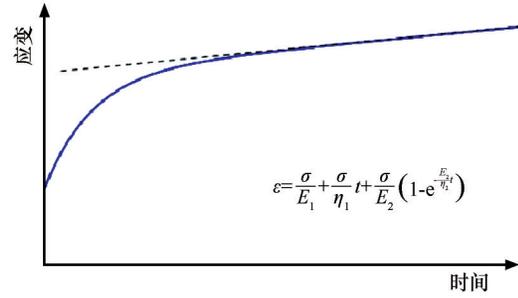


图 9 Burgers 模型典型蠕变曲线  
Fig. 9 Typical creep curves from Burgers viscoelastic model

Burgers 模型能较好地描述冻土蠕变的弹性变形、初始蠕变及稳定蠕变变形, 见图 9, 不过在稳定蠕变阶段蠕变曲线完全呈线性发展。

针对单轴蠕变试验结果采用 Burgers 黏弹性模型进行了拟合分析, 如图 10 ~ 12 所示。从图中可以看出, 得到的拟合曲线与实测曲线整体都比较吻

合; 从表 3 中也可以看到, 拟合得出的相关系数  $R^2 \geq 0.85$ , 平均为 0.95。从拟合曲线拟合结果的吻合侧重点不同: 流变模型能表示出蠕变曲线的初始蠕变阶段, 从而在初始蠕变阶段吻合度较高, 但是在稳定蠕变阶段表达出的是恒定的蠕变速率, 与实测曲线有些差别。

表 3 Burgers 黏弹性模型反演参数  
Table 3 Burgers viscoelastic model inversion parameters

荷载/kPa	温度/°C	质量含水量/%	$E_1$ /MPa	$E_2$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·min)	$\eta_2$ /(MPa·min)	$R^2$
100	-0.3	15	9.6	46.0	173 224	9 000	0.94
		25	8.0	3.6	55 890	1 300	0.85
		35	7.0	2.9	10 457	600	0.92
	-0.7	15	12.4	41.0	292 252	1 000	0.98
		25	8.5	9.8	48 657	1 500	0.95
		35	5.8	6.2	21 424	1 508	0.94
	-1.5	15	15.0	37.0	499 499	3 300	0.90
		25	10.0	23.0	158 657	3 000	0.88
		35	7.5	20.0	132 668	2 500	0.87
200	-0.3	15	12.0	45.0	400 303	1 000	0.99
		25	8.0	4.6	46 935	368	0.94
		35	6.5	1.9	11 078	354	0.99
	-0.7	15	17.0	32.0	682 768	1 000	0.92
		25	14.0	5.8	62 130	1 100	0.97
		35	8.6	4.0	23 673	2 219	0.99
	-1.5	15	22.0	38.0	313 640	1 500	0.91
		25	16.0	26.0	120 649	2 054	0.97
		35	12.0	13.0	89 370	3 241	0.94
300	-0.3	15	12.5	90.0	926 906	2 000	0.99
		25	4.3	4.6	36 926	580	0.94
		35	3.5	2.0	17 346	186	0.97
	-0.7	15	14.0	120.0	956 568	3 500	0.99
		25	11.2	6.0	46 187	1 012	0.98
		35	6.7	3.6	27 712	607	0.98
	-1.5	15	19.0	140.0	1 345 487	8 000	0.99
		25	13.6	42.7	101 476	10 046	0.97
		35	10.1	19.7	38 837	5 746	0.99

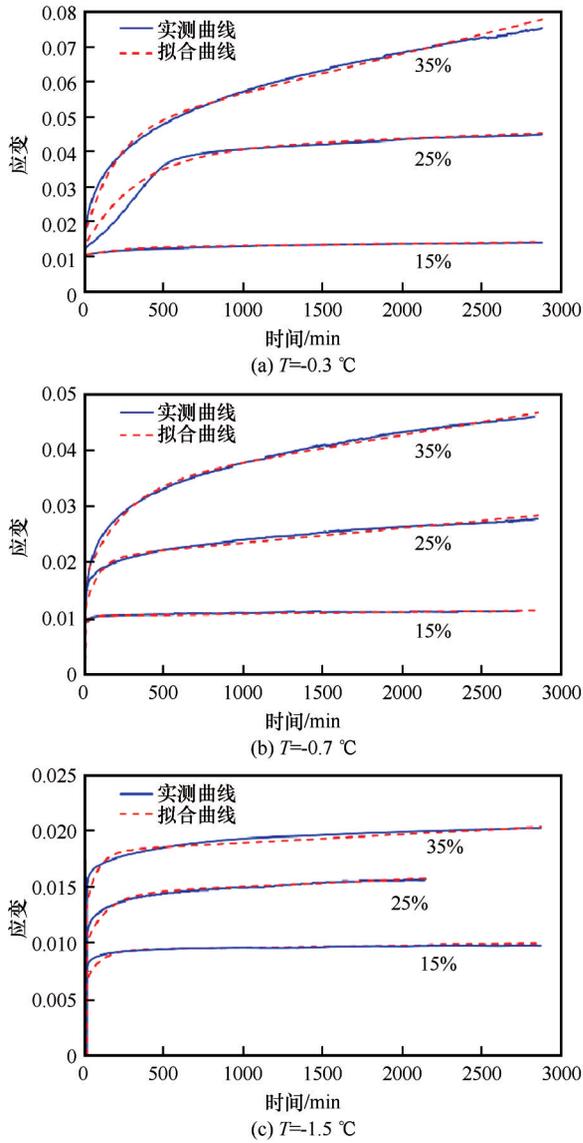


图 10 100 kPa 下流变模型拟合结果

Fig. 10 Rheological model fitting results under 100 kPa load

从图中看出,拟合曲线与实测曲线的吻合度整体较高,尤其是在稳定蠕变阶段。在初始蠕变阶段吻合度稍差,尤其是在荷载水平较低的情况下,随着荷载的增大,吻合度明显提高。需要指出的是,Burgers黏弹性模型在蠕变后期的变形趋势呈线性变化(无衰减),而对于冻土来说在长期蠕变过程中随着时间增加必然会呈现出衰减趋势,从而导致两者之间的差异逐渐增大,因此在实际工程应用中应该予以考虑。

初始弹性模量  $E_1$  表示的是加载瞬时的变形抵抗能力,表3显示  $E_1$  随着温度的降低而增大,随着含水量的升高而快速减小,但随着加载水平的增大变化趋势不明显。渐进弹性模量  $E_2$  表示的是初始蠕变阶段土体的变形抵抗能力,其与  $E_1$  的变化趋势

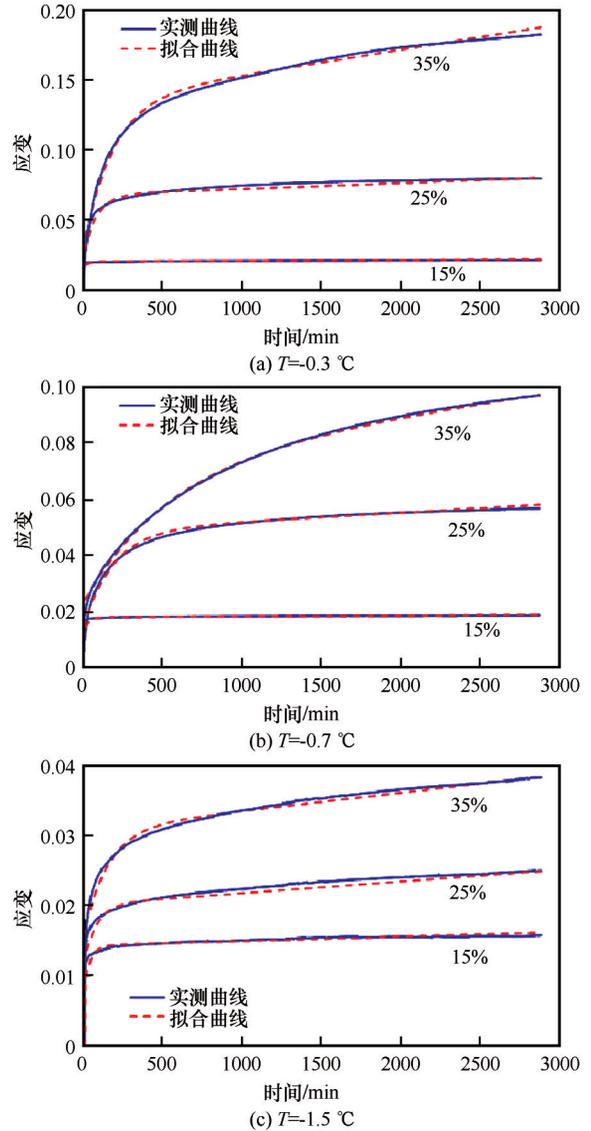


图 11 200 kPa 下流变模型拟合结果

Fig. 11 Rheological model fitting results under 200 kPa load

非常接近。 $\eta_2$ 能够反映土体到达稳定蠕变阶段的快慢,值越大变形曲线斜率越小表明到达稳定蠕变阶段越慢,图10~12都显示出较高的初始蠕变阶段曲线拟合度,但拟合参数随着温度、含水量和荷载的变化没有显著的变化趋势。 $\eta_1$ 能反映出土体在稳定蠕变阶段的变形速率,其值越小变形速率越大,表中基本反映出温度越高、含水量越大、荷载越大冻土稳定蠕变速率越高。

### 5 结论

为了研究高温冻土蠕变变形特征以及受到温度、含冰量及荷载等因素的影响,本研究开展了室内单轴蠕变试验,主要得出以下结论:

- (1) 在当前试验条件下,冻土蠕变曲线只存在

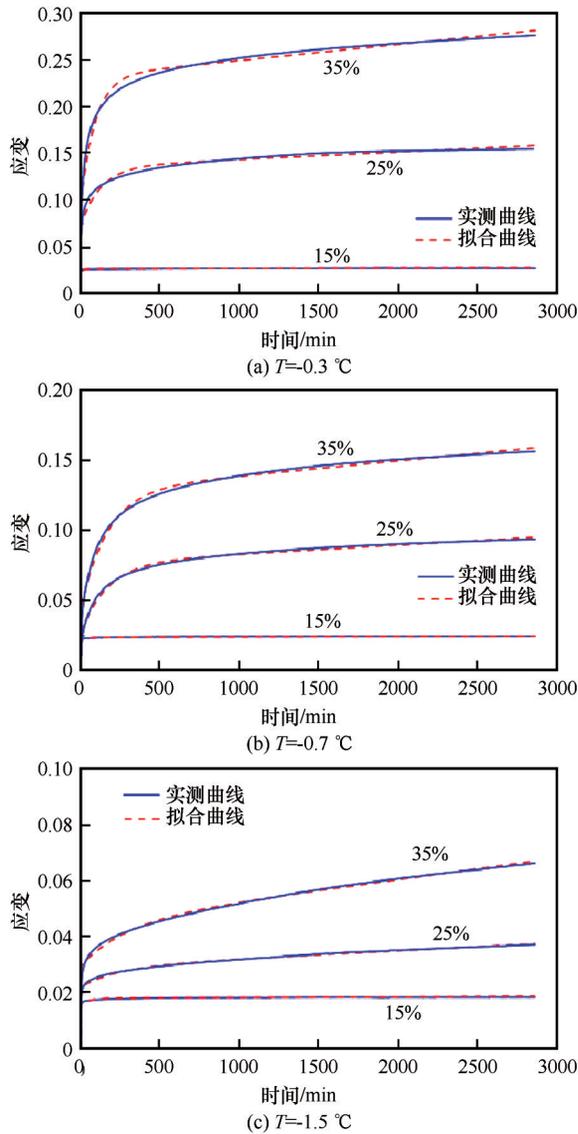


图 12 300 kPa 下流变模型拟合结果

Fig. 12 Rheological model fitting results under 300 kPa load

3 个阶段: 瞬时弹性变形、初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段, 没有出现渐进流阶段。在稳定蠕变阶段, 蠕变速率在缓慢减小, 蠕变曲线出现轻微衰减现象。

(2) 温度是影响冻土蠕变的最重要的外在因素, 而含冰量是影响冻土蠕变的关键内在因素。当含冰量较低时, 冻土稳定蠕变速率较小, 即使温度及荷载的大幅改变也没有引起其明显变化。但是在高含水量条件下, 温度及荷载的改变对蠕变速率的影响非常显著, 甚至能引起其量级上的差别。

(3) Burgers 黏弹性模型可以较好地描述冻土蠕变曲线过程, 尤其是在稳定蠕变阶段。该模型较为简单, 参数较少且物理意义明确, 适于工程推广应用。但在长期蠕变过程中随着时间增加必然会

呈现出衰减趋势, 从而导致模型曲线与实测曲线之间的差异逐渐增大, 因此在实际工程应用中应该予以考虑。

#### 参考文献 (References):

- [1] Guo Guodong. Construction of Qinghai-Tibet Railway with cooled roadbed[J]. China Railway Science, 2003, 24(3): 1-4. [程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 1-4.]
- [2] Cheng Guodong. Research of engineering geology of the roadbed in permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 134-141. [程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134-141.]
- [3] Chen Hui, Zhang Ze, Feng Wenjie et al. Research progress of piles' thermostability in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 362-369. [陈辉, 张泽, 冯文杰, 等. 寒区桩基热稳定性研究进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 362-369.]
- [4] Zhang Ze, Ma Wei, Zhang Zhongqiong. System and method of geocryology in engineering geology[J]. Earth Science, 2016, 41(2): 351-360. [张泽, 马巍, 张中琼. 工程地质学中冻土研究的系统与方法[J]. 地球科学, 2016, 41(2): 351-360.]
- [5] Vyalov C C. Rheology of frozen soil[M]. Liu Jiankun, Trans. Beijing: China Railway Press, 2005. [维亚洛夫, C C. 冻土流变学[M]. 刘建坤, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2005.]
- [6] Ma Wei, Sheng Yu, Wu Ziwang. Stress change in ice during the creep deformation of frozen soil[J]. Process in Natural Science, 1994, 4(6): 921-926. [马巍, 盛煜, 吴紫汪. 冻土蠕变过程中冰及冰相应力的变化[J]. 自然科学进展, 1994, 4(6): 921-926.]
- [7] Wu Ziwang, Ma Wei. Strength and creep of frozen soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994: 141-148. [吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994: 141-148.]
- [8] Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi. Elastic and compressive deformation of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29-40. [朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29-40.]
- [9] Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi, Xie Xiande. In-situ creep test research of ground ice on Qinghai-Tibet Plateau[C]//Proceedings of the Permafrost Research on Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 124-130. [朱元林, 刘永智, 谢先德. 青藏高原地下冰现场蠕变试验研究[C]//青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 124-130.]
- [10] McRoberts E C, Law T C, Murray T K. Secondary creep interpretation of ice-rich permafrost[C]//Proceedings of 5th International Conference on Permafrost. Trondheim, Norway: Tapir Publications, 1988: 1137-1142.
- [11] Ma Xiaojie, Zhang Jianming, Chang Xiaoxiao, et al. Experimental study on creep of warm and ice-rich frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 848-852. [马小杰, 张建明, 常小晓, 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.]
- [12] Zheng Bo, Zhang Jianming, Ma Xiaojie, et al. Study on compression deformation of warm and ice-rich frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Suppl 1): 3064-3069. [郑波, 张建明, 马小杰, 等. 高温-

- 高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3063 - 3069. ]
- [13] Liu Shiwei, Zhang Jianming, Zhang Hu. Compression test and pore-water pressure measurement for warm and ice-rich frozen soil [C]//Proceedings of 10th International Conference on Permafrost. Hinkel K M, editor, Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, The Northern Publisher, 2012: 237 - 242.
- [14] Wang Ningning, Zhang Hu, Zhang Jianming, et al. Experimental study of pore water pressure of high temperature frozen soil under different temperatures and drainage conditions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1167 - 1172. [王宁宁, 张虎, 张建明, 等. 不同温度及排水条件下高温冻土孔隙水压力试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1167 - 1172. ]
- [15] Zhang Zhilong, Zhang Jianming, Zhang Hu, et al. Experimental study of the engineering properties of warm frozen soil treated with ionic soil stabilizer (ISS) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 140 - 146. [张致龙, 张建明, 张虎, 等. 离子类土壤固化剂对高温冻土工程性质改良试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 140 - 146. ]
- [16] Zheng Bo, Zhang Jianming, Ma Xiaojie, et al. Identification and parameter inversion of viscoelastic model for warm and ice-rich frozen soil [C]//Proceedings of 10th Academic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, China Civil Engineering Society. 2007: 390 - 395. [郑波, 张建明, 马小杰, 等. 高温-高含冰量冻土黏弹性模型辨识与参数反演 [C]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议. 2007: 390 - 395. ]

## Study on creep test and creep model of warm frozen soil

YANG Suiqiao<sup>1,3</sup>, WANG Ningning<sup>2</sup>, ZHANG Hu<sup>3</sup>

(1. Lanzhou Mineral Exploration Institute, Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metal of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to investigate the creep deformation behavior of warm frozen soil and its relationship with various influencing factors, uniaxial creep tests were carried out in laboratory on the specimens with moisture contents of 15%, 25% and 35%, load levels of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa, and temperatures of  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Then, the creep deformation behaviors of warm frozen soil under different temperatures, ice contents and load conditions were analyzed. The results revealed that the creep deformations of the warm frozen soils could reach a considerable level, and they showed an attenuated tendency under current conditions. Soil temperature was the most important external factor for influencing frozen soil creep while ice content was the key inherent one. When contained a lot of ice, the warm frozen soil might develop a remarkable variation in creep rate when soil temperature or load changed, even on the order of magnitude. Under current test conditions, the Burgers viscoelastic model could be applied to express the creep deformation process of warm frozen soil with a satisfactory fitting degree.

**Key words:** warm frozen soil; creep behavior; attenuate creep; Burgers viscoelastic model

(责任编辑: 刘建坤; 编辑: 周成林)