

万福矿井深部人工冻结粘土层的力学性状

李耀民^{1,2}, 姜振泉¹, 李秀晗², 李建硕¹

(1 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2 充矿集团 菏泽能源化工有限公司 山东 菏泽 273500)

摘要: 根据万福矿井 400 m 以下巨厚粘土层取样进行的冻土力学性状试验结果, 深部冻结粘性土的应力应变关系主要表现为应变软化特点, 达到峰值应力之前显现较大幅度的屈服变形。从冻结效果看, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是使深部粘性土力学性状发生明显变化的冻结状态界限值, 冻结粘土样的强度明显提高, 而蠕变性则明显降低, 达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 随着温度进一步降低, 强度和蠕变性的变化则逐渐趋缓。

关键词: 矿井深部; 人工冻结; 粘性土; 单轴抗压强度; 蠕变性

中图分类号: P642 14; TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)03-0297-04

Mechanical Properties of Deep Frozen Clay in Wanfu Mine

LI Yao-min^{1,2}, JIANG Zhen-quan¹, LI Xiu-han², LI Jian-shuo¹

(1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;
2 Heze Energy and Chemical Industry Corporation Limited, Yanzhou Coal Mining Group, Heze 273500 Shandong, China)

Abstract Based on the results from mechanical properties test for frozen soil which is sampled from the depth over 400 m in Wanfu mine, the stress-strain relationships of the deep frozen clay mainly show the strain-intenerating characteristics, and display large extend yield deformation before reaching the peak stress. According to the frozen effect, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is the boundary value of frozen temperature for inflecting the mechanical properties of deep clay. The compression strength of frozen clay enhances obviously and the creep weakens distinctly under frozen temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and further changes of both strength and creep gradually tend to let down despite frozen in lower temperature.

Key words: deep mine; artificial frozen soil; clay; uniaxial compression strength; creep characteristics

0 引言

随着中国东部巨厚松散层矿井的开发建设, 深层冻土力学性质研究也越来越受到关注^[1-2]。深层冻土研究在中国起步较晚, 迄今的研究主要是限于深层冻土的力学特征方面^[3-5]。已有研究结果表明, 深层冻结土的力学性状与一般冻土有较大差异, 尤其是深层粘土经历过高压固结, 所具有的较特殊结构性和含水性是影响冻土强度和变形性的主要因素^[6-8]。

菏泽矿区万福井田工厂井筒位置在新生界厚度为 760 m, 其中, 粘性土层占 70% 以上。冻结粘

土层的蠕变性较强, 深部粘土层冻结壁稳定性是影响万福矿建井施工的关键因素。为了解深部粘土层可冻结性及其冻土的力学性状, 在主井检查孔 400 m 以深 3 个超过 30 m 的巨厚粘性土层段和 2 个砂土层段取样进行了系统的冻土力学性状研究。笔者基于试样测试结果, 重点对深部冻结粘土层的蠕变性进行分析。

1 试验土层的物理力学性质

测试土样取自主井 445.5~712 m 深度的 3 个粘性土层, 其单层厚度均在 30 m 以上, 同时在其下部粉细砂层取样进行了对比试验, 结果如表 1。

收稿日期: 2007-10-20

作者简介: 李耀民(1964—), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 工学博士研究生, 从事矿井地质研究。E-mail: liyue1126@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 试验土样主要物理指标

Tab. 1 Physical Parameters of the Test Soil Samples

试样层号	取样深度/m	岩性	含水量/%	天然重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	塑性指数	液性指数
1	448 5~459 6	粉质粘土	18 4	20 4	0 8	12 8	—0 14
2	530 3~543 9	粉质粘土	18 6	21 2	0 5	10 4	—0 20
3	682 8~690 8	粘土	24 1	20 8	0 6	19 7	—0 08
4	726 1~748 9	粉细砂	19 3	21 9	0 45		

2 冻结粘土的单轴抗压强度及应力应变关系

冻土试验在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用 CSS-1120 电子万能材料试验机和 MTS-810 材料试验机完成, 每层土均取 2 个试样进行 3~5 种不同温度(—15℃~—35℃)下的单轴抗压强度测试, 且粘土试样全

部采用原状样按规范要求制备^[9]。表 2 列出不同冻结温度的冻土峰值强度和破坏应变, 图 1 为部分冻土试样的单轴压缩曲线。

作为对比, 图 1、表 2 中也给出了冻结粉细砂和粘性土原状样的单轴抗压强度测试结果(粉细砂样因制取原状样困难, 采取按原状样含水量和质量密度制取重塑样)。

表 2 深层土不同状态(冻结)单轴抗压强度测试结果

Tab. 2 Uniaxial Compressive Stress and Utmost Strain of the Deep Clay Samples Under Different Frozen Temperature

层位	取样深度/m	岩性	非冻结原状土		冻结土		
			抗压强度/kPa	破坏应变/%	试验温度/℃	抗压强度/MPa	破坏应变/%
1	448 5~459 6	粉质粘土	11 2	11 1	—15	6 41	17 0
					—20	6 90	8 8
					—25	8 85	9 6
2	530 3~543 9	粉质粘土	13 5	28 3	—15	7 9	4 3
					—20	8 4	6 1
					—25	16 4	5 3
3	682 8~690 8	粘土	33 4	11 7	—15	10 1	5 4
					—20	10 4	5 1
					—25	11 2	7 2
					—30	10 8	10 2
					—35	12 1	10 8
4	726 1~748 9	细砂			—15	10 3	7 7
					—20	18 1	6 5
					—25	20 1	5 8

注: 表中所列测试值均为 2 个平行试验的算术平均值

试验结果表明, 冻土试样的应力应变关系曲线在较大的应变幅度后普遍显现应变软化特点, 在低于 2% 的应变幅度内, 粘性土和砂土不同冻结温度冻土样应力应变的线性关系比较明显; 反映在切线模量上, 冻结砂土与冻结粘性土反映的差异性比较显著; 粘性土试样在 2% 的应变幅度内的切线模量虽随冻结温度提高而加大, 但变化幅度较小, 大致在 210~400 MPa 内; 与此相比, 砂土样的变化则相对明显, 在 —15℃ 下的切线模量为 245 MPa, 而相对于 —20℃ 和 —25℃ 温度下的切线模量则分别大幅增至 650 MPa 和 800 MPa。

与原状试样的单轴压缩试验结果相比, 虽然室

内试验条件下深部冻结粘性土力学性状得以明显改善, 但冻土的强度较冻结粉细砂样低得多, 在 —20℃ 试验温度下单轴抗压强度普遍低于所处深度的上覆自重压力(以土层平均重度为 18 kN/m³ 计)。另外, 冻结粘性土样在达到峰值强度前普遍表现有很明显的屈服应变, 这种变形特点对于井筒施工过程冻结壁为维护十分不利。

3 冻结粘性土的蠕变性

冻土样蠕变试验试样由原状土样制取, 每层土均进行 3 种不同冻结温度的冻土测试。试验方法是将恒温好的试样置于材料试验机的试验箱中, 然

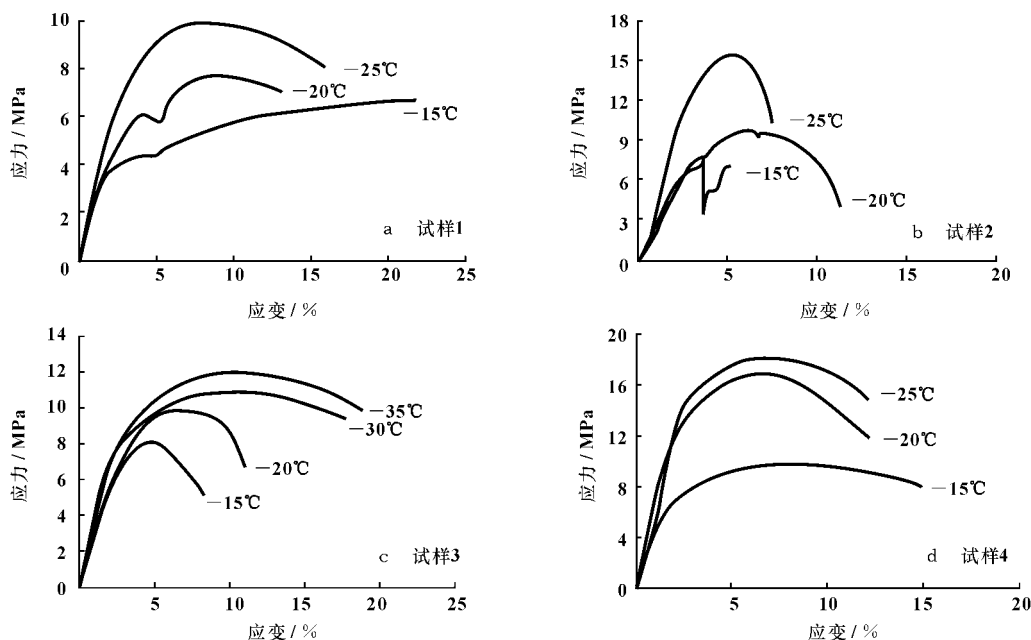


图 1 不同冻结温度状态下土样的应力-应变关系

Fig. 1 Stress-Strain Relationships of Soil Samples under Different Frozen Temperature

后在不同恒载下进行蠕变试验, 以应变率出现拐点或应变达到 20% 作为结束试验标准。

试验结果表明, 冻结粘性土的蠕变起始压力随温度降低而增大, 而冻土流变性则随温度降低而降低。如图 2 中试样 3 在不同温度下的应力蠕变速率关系曲线, -15°C 、 -20°C 、 -25°C 3 种温度下冻结粘土样的蠕变起始压力(对应于应力蠕变速率关系曲线的陡变点)分别为 3.5、5.7、6.2 MPa, 表明温度是影响冻结粘性土蠕变性的重要因素。

试验也反映出, 不同温度下冻结粘性土在蠕变过程中均出现一个相对稳定的阶段, 此时的蠕变速率 $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ 为一常数, 通常将其定义为流变或流动速度 $\dot{\epsilon}_m$ 。试验发现, 深部粘性土冻结状态下的流动速度与蠕变应力之间存在很强的关联性, 二者的拟合关系为

$$\dot{\epsilon}_m = \alpha e^{\beta \sigma}$$

式中: $\dot{\epsilon}_m$ 为蠕变速率; α 、 β 为拟合系数。3 层粘性土冻结试样试验获得的 α 、 β 值见表 3。

综合分析试验结果(图 2、表 3)发现, 与 -15°C 条件相比, -20°C 下粘性土的蠕变起始压力成倍提高, 而流变速度降低的幅度达到了数量级; 与其相比, 降低温度至 -25°C 条件下, 蠕变起始压力和流变速度与 -20°C 条件下的差异则小得多。由此认为, 对于粘性土层冻结状态的蠕变性, -20°C 是一个重要的界限值, 可以作为深层粘性土冻结施工

设计的一个重要依据。

表 3 冻结粘土蠕变速率拟合系数

Tab. 3 Creep Speed Fitting indices of the Frozen Clay Samples			
层号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	α	β
1	-15	20×10^{-7}	8 261 3
	-20	19×10^{-6}	5 693 9
	-25	12×10^{-3}	2 270 6
2	-15	19×10^{-3}	6 504 5
	-20	18×10^{-4}	4 658 8
	-25	15×10^{-1}	2 965 7
3	-15	15×10^{-2}	4 310 1
	-20	17×10^{-4}	4 123 5
	-25	18×10^{-1}	3 727 9

综上所述, 冻结温度与粘性土蠕变性关系受深部粘性土层结构影响较大。由于高压固结, 粘性土中水以结合水为主, 因结合水冻结温度要比重力水低得多, 温度降低至 -20°C 以下, 土中胶结冰含量会因结合水的冻结而明显增加, 由此导致冻结土强度明显增大及流变性急速降低。

本次试验土样采自深部土层, 考虑到原状样和重塑样冻结状态力学性状的差异, 对取样器进行了必要技术改进, 取样和装、运过程也采取了必要措施以降低对土样的扰动程度。尽管如此, 试验土样的原状仍只是相对而言。因此, 原位冻结土层的强度条件和变形性与试验结果仍会存在一定的差异。另外, 考虑到深部粘性土层的压力环境, 原位冻结

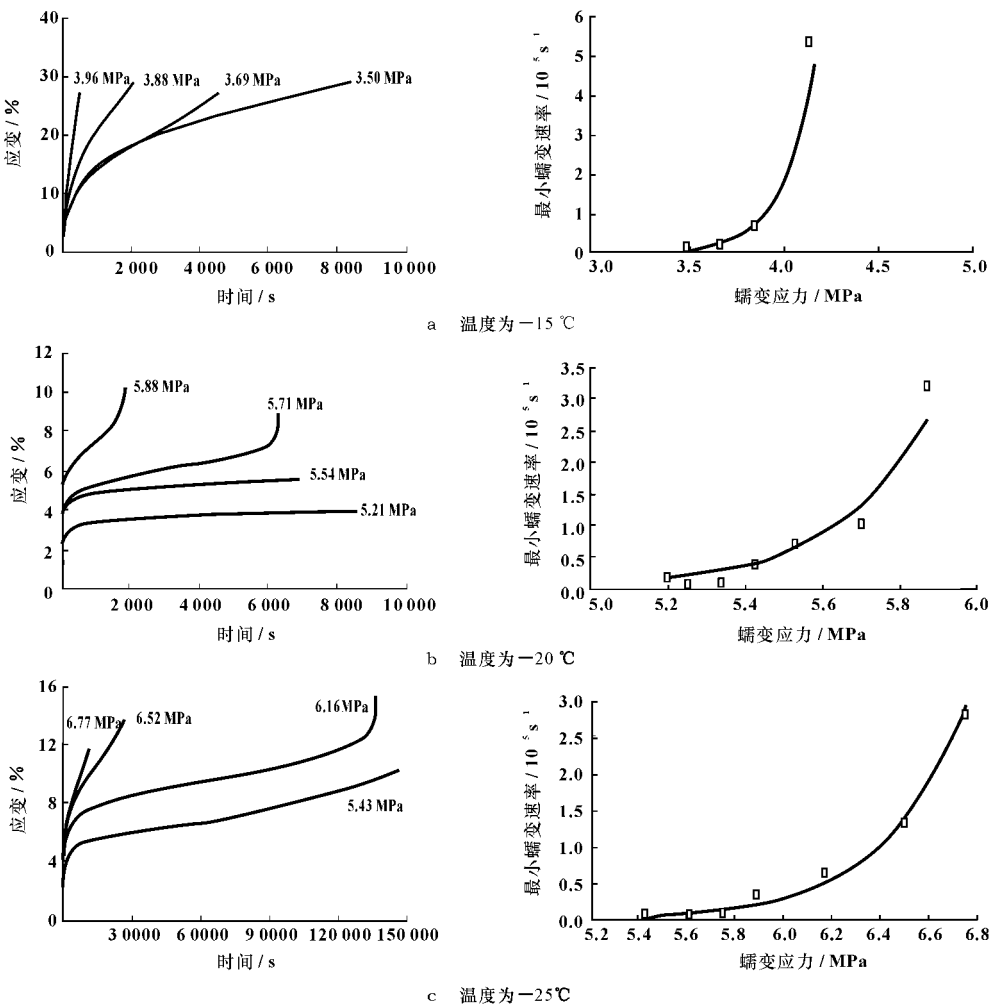


图 2 冻土粘土样(试样 3)蠕变曲线及应力蠕变速率

Fig. 2 Curves of Creeping Process and Relationships Between Creep Velocity and Creep Stress of the Frozen Clay Sample

要达到室内试验的冻结状态也存在较大的技术难度,所以,试验所反映的问题应在冻结和建井施工中予以充分注意。

4 结语

(1) — 20 °C试验温度下,深部冻结粘性土可以达到大致与其上覆自重压力相当的强度,此温度以下其蠕变性可得以有效控制,应作为原位冻结的最低控制标准。

(2) 冻结粘性土样在达到峰值强度前表现有很明显的屈服应变,这种变形特点对于井筒施工过程冻结壁的维护十分不利。建井施工中揭露后应合理设计井壁浇注段高以尽量减少井壁浇注时间,必要时可采取有效的临时支撑措施,以降低冻结壁的蠕动变形。

参考文献:

[1] 陈湘生. 冻土力学研究——21 世纪岩土力学研究的重要领域[J]. 煤炭学报, 1998, 23(1): 53-56.

[2] 崔广心. 深土冻土力学——冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 97-100.

[3] 李 毅, 崔广心, 吕恒林. 有压条件下湿粘土结冰温度的研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 43-46.

[4] 吴紫汪, 马 巍, 常小晓. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.

[5] 马 巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力应变特性影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 198-201.

[6] 李栋伟, 汪仁和. 冻土抗剪强度特性及试验研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2004, 24(增刊): 185-187.

[7] 李海鹏, 林传年, 张俊兵, 等. 原状与重塑人工冻结粘土抗压强度特征对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2861-2864.

[8] 杨 平. 深部原状和扰动冻结粘土力学性能差异研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 57-61.

[9] GB/ T500123- 1999, 土工试验方法标准[S].

1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net