

DOI: 10.11779/CJGE201709011

长时高压 K_0 固结再冻结黏土的卸围压强度特性

王衍森^{1, 2}, 贾锦波¹, 冷阳光²

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 深厚表土层中立井井筒建设普遍采用冻结法, 而深部冻土的原位力学特性是影响冻结壁力学特性及其安全稳定的关键; 现有的浅部冻土的试验方法, 由于忽略了深、浅部土体固结、应力环境及形成工况的差异, 已难以可靠地获得深部土的力学参数。基于“长时高压 K_0 固结—冻结—恒轴压卸围压”试验模式, 通过三轴试验, 研究了深部土重塑人工冻结黏土的强度与变形特征, 以及固结时间、固结应力的影响规律。结果表明: 卸围压路径下冻土试样呈现为黏—弹塑性破坏, 固结时间为 1~7 d 时, 其卸围压强度随固结时间的延长增长显著, 而单位降温引起的强度增长速率受固结时间的影响不明显; 随着固结时间延长至 28 d, 其卸围压强度受固结时间的影响不明显, 但单位降温引起的强度增长速率增加显著; 单位降温引起的冻土卸围压强度增长速率不受固结应力影响。

关键词: 长时 K_0 固结; 深部黏土; 有载冻结; 卸围压强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1636-09

作者简介: 王衍森(1973 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土特殊施工技术方面的教学和科研工作。E-mail: yswang@cumt.edu.cn。

Strength properties of unloading confining pressure of long-term K_0 -consolidated artificial frozen clay under high pressure

WANG Yan-sen^{1, 2}, JIA Jin-bo¹, LENG Yang-guang²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining Science and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining Science and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In most cases, the artificial ground freezing method has been applied to construction of vertical shaft in deep and thick alluvia. Thus the in-situ mechanical properties of deep frozen soils are the most pivotal influence factor to the stabilization of frozen wall. It is suspicious to acquire the mechanical parameters of deep soils by the methods which are suitable for shallow soils ignoring their engineering situation and origin. Therefore, based on the new test mode of "Long-term, K_0 consolidated-freezing-constant axial pressure and unloading confining pressure", many triaxial unloading tests are conducted on remolded deep clay so as to study its strength and deformation properties and the influence laws of consolidation stress and consolidation time. The research results show that the failure mode of the frozen clay specimens under unloading path belongs to the viscoelastic-plastic one. The strength of the frozen clay consolidated for 1 to 7 days under unloading path increases evidently, however, the growth rate of strength is barely affected by the consolidation time while temperature decreases. Conversely, the strength increases inconspicuously when the consolidation time is expended to 28 days. In addition, there is significant increase of growth rate of strength relating to the descending temperature in the process of the long-term K_0 consolidation. The influence of consolidated stress on the growth rate of strength hardly relates to the subzero temperature.

Key words: long-term K_0 consolidation; deep clay; loading freezing; strength of unloading confining pressure

0 引 言

深厚冲积层中井筒建设普遍采用人工地层冻结技术, 即利用人工冻结形成的封闭式冻土结构(冻结壁)承担外部水土压力, 且在其掩护下开展井筒的掘砌施工^[1]。该工法中, 冻结壁的强度、变形特性直接关系到工程施工的安全; 而冻结壁的力学特性, 从根本上

取决于深部冻土的原位力学性质。受土体三相组成及固结应力、固结历史以及“先固结, 后冻结”的形成特点的影响, 冻土的原位力学特性甚为复杂。忽略其形成历史与特点, 将难以获得可靠的力学参数。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174194)

收稿日期: 2016-11-01

目前, 对于深、浅部土在固结应力、固结历史、形成特点及工程应力路径等方面区别, 国内外已有一批学者给予了高度重视, 进行了大量研究。深部土方面, 马巍等^[2]研究了固结过程对冻土应力-应变特性的影响。许延春^[3]对深部饱和黏土进行了研究, 得出了变形模量随着深度的增大是波动的, 各矿黏土变形模量各不相同, 其差异最大可相差约 5 倍; 黏聚力和内摩擦角随埋深增大而分别呈现波动增大和减小的趋势。李文平等^[4]通过试验研究表明高压下饱和黏土受压变形机理不符合太沙基固结理论, 而且可能与吸附结合水的排出可能有关。商翔宇^[5]利用华东地区高液限黏土, 对围压从 0.2 MPa 到 9 MPa 共 11 个不同压力等级下的三轴固结不排水剪切试验研究, 发现临界剪切应力比随围压增大而减小, 可用双线性方程近似描述; 随围压增大, 土样由塑性外鼓破坏转变为脆性破裂破坏。Watabe 等^[6]对深部土体进行了较为深入系统的研究, 研究表明土体物理指标比如含水量、密度和孔隙率随深度没有明显的规律性, 但剪切强度和固结屈服应力则随深度近似呈线性增大。在深部冻土方面, 李海鹏等^[7]对原状和重塑人工冻结黏土进行了抗压强度试验, 结果表明原状冻结黏土表现为脆性破坏, 而重塑冻结黏土表现为塑性破坏。王衍森等^[8]认为深部人工冻土是由深部天然土体在原始地压作用下冻结而成的, 会通过影响土的物理性质指标(如密度)而影响冻土的力学性质。王大雁等^[9]对深部人工冻土冻结过程、受力过程进行模拟, 对其进行不同温度、初始应力下的减载试验研究, 得到了冻土破坏过程应力-应变曲线并分析了破坏应变、破坏应力与初始围压、冻结温度的关系。

目前对于深部冻土的力学参数, 试验手段多利用重塑土, 经短时高压固结后开展剪切试验, 且多数采用“先冻结, 后固结”条件下的加载试验。赵晓东等^[10]采用先冻结后固结的试验模式对不同温度梯度下的冻结黏土进行三轴压缩试验, 研究表明不同温度梯度三轴压缩强度随围压增加均表现为先升高后降低。王大雁, 王大雁等^[11]通过对先经历 K_0 固结后冻结的重塑深部人工冻土的研究得出: 冻土的屈服强度随初始围压的增大、冻结温度的降低而增大。显然, 深部冻土的初始固结状态、工程应力路径与试验模式不同, 必然导致试验结论的不同, 所以对于实际工程中的深部

冻土力学性状, 必须考虑试验模式及试验结果的适用性。

深部人工冻土是深部高压 K_0 固结土体经原位冻结而形成。鉴于此, 本文将针对深部冻结黏土的高压固结状态、形成特点及应力路径, 利用深部重塑黏土, 开展长时高压 K_0 固结再冻结黏土的恒轴压卸围压(后文简称卸围压)三轴剪切试验, 探讨固结应力、固结龄期等因素, 对“先固结再冻结”黏土的卸围压强度及其变形特性的影响规律。

1 试验方案及步骤

1.1 试验用土及试验仪器

(1) 试验用土

试验所用的土料为山东某煤矿深部黏土, 物理参数见表 1。本试验统一采用 $\Phi 61.8 \times 125$ mm 的土样, 并进行饱和。

(2) 仪器与设备

试验采用 SKA-1 型 K_0 固结仪和自制高压杠杆式加压系统上开展土样固结测量 K_0 值; 采用 DL-4050 型低温冷却循环泵对受恒定轴向荷载的土样进行冻结; 采用 TATW-500 型土与冻土动静态高压三轴试验系统进行恒轴压、卸围压试验。试验过程中通过荷重传感器、液压传感器和温度传感器对轴压、围压和冻土温度进行监测与核准。试验设备示意图如图 1。

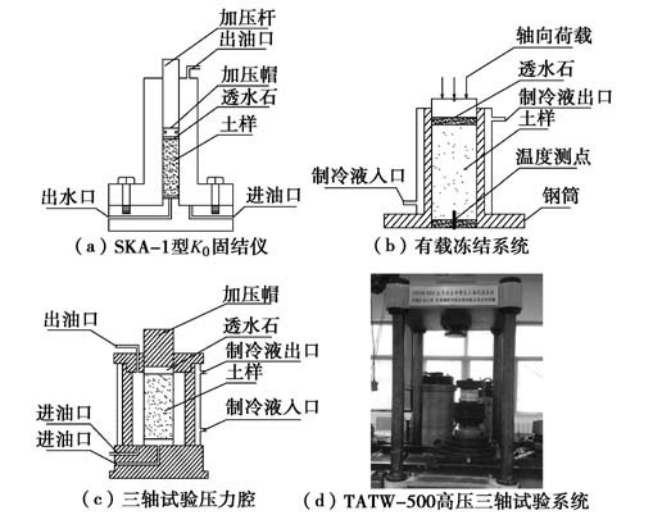


图 1 试验仪器与设备

Fig. 1 Test apparatus

表 1 试验用土物理参数

Table 1 Parameters of clay for experiment

G_s	w_{sr} /%	w /%	ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	颗粒成分/mm					w_L /%	w_p /%
				>0.25	0.25~0.1	0~0.075	0~0.045	<0.045		
2.71	38	27.8	2.17	3%	6.32%	2.71%	6.11%	81.86%	58.83	28.93

1.2 试验方案及步骤

(1) 利用高压 K_0 固结仪、钢筒固结模具和自制的杠杆式加载装置,开展重塑黏土试样不同固结时间、不同固结压力下高压 K_0 固结试验。固结时间取 1, 3, 7, 14, 28 d; 固结应力取 8, 10, 12, 14, 16 MPa。得到不同固结条件下土体的 K_0 值。

(2) 土样固结至不同时间后,开展有载冻结,冻结温度分别取 -5°C , -10°C , -15°C , -20°C , -25°C ; 冻结 2 h 左右即可降至目标温度,随后保持温度恒定 2 h 以上,确保冻结均匀。冻结完成且变形稳定后,将土样从模具中取出,装入乳胶膜并放入恒温箱临时保存。试验发现,该过程土样回弹变形很小。

(3) 将冻结土样装入压力腔内,如图 1 (c),从下到上依次放置透水石、土样、透水石和带凹槽的尼龙加压帽,并向压力腔内充入低温冷冻液压油,并通过反复充液降低液压油中的气泡含量。

(4) 将安装好的压力腔置于 TATW-500 型高压三轴试验系统中,通过压力腔外冷却液循环,恢复土样冻结状态,达到原冻结温度后维持 12 h; 而后开启压力机使冻结土样恢复至 K_0 应力状态(先等比例加载至三向压力均等于原围压,再轴向加载至竖向固结应力,该过程保持围压不变)。鉴于黏土长时固结不能完全在伺服试验机上进行,不得不采用上述步骤; 其中有载冻结土样的卸载及应力恢复过程,将对试验结果造成一定影响。由于全部试样均遵循同样的步骤进行,且考虑到本试验侧重研究固结时间等因素变化,对冻土卸围压强度参数等相对影响规律,因此,分析认为采用该方法可以忽略相对误差。

(5) 对温度、应力状态恢复后的土样,按照恒轴压卸围压的应力路径开展三轴剪切试验,如图 2,获得土样的应力-应变曲线。

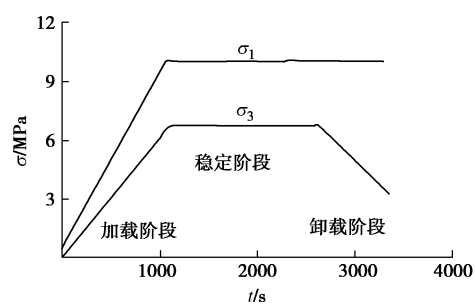


图2 三轴试验应力路径

Fig. 2 Stress paths of triaxial tests

本试验方案采用单因素循环试验, 方案安排如表 2。

2 试验结果与分析

2.1 冻土的破坏特征

表2 单因素循环试验安排

Table 2 Arrangement for single-factor tests							
编号	$T/^{\circ}\text{C}$	t/d	σ_1/MPa	编号	$T/^{\circ}\text{C}$	t/d	σ_1/MPa
1	-5	1	8	13	-15	14	10
2		7		14		28	
3	-10	7	8	15	-15		12
4		28		16		7	14
5	-15	1	8	17			16
6		3		18	-20		8
7		7		19			10
8		14		20		7	12
9		28		21			14
10	-15	1	10	22	-25		16
11		3		23		14	10
12		7		24		3	8

本试验中,土体首先经历长时高压 K_0 固结过程,而后进行恒轴压侧向位移全约束的有载冻结。冻结完毕,进行恒轴压卸围压试验。试验过程中偏应力逐步增大,土体的轴向应变逐步发展,在变形的前期土体体积并没有发生变化,土体侧向膨胀横截面面积增大。随着变形的进一步发展,土体内部引入空隙的体积逐步增大,土体的结构性由于空隙的引入而减弱,直至结构完全破坏,完全失去承载能力。冻结温度 -25°C 、固结应力 8 MPa 不同固结时间土样恒轴压卸围压三轴剪切破坏形态如图 3。

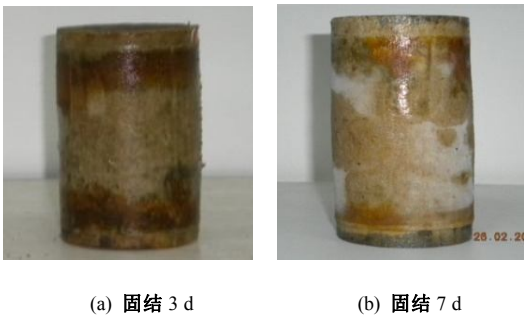


图3 土样破坏特征

赵晓东等^[10]对不同温度梯度下的冻结黏土进行三轴压缩试验,研究不同温度梯度下的冻土破坏形态及温度梯度、围压对冻土强度的弱化效应,发现:温度梯度对冻土破坏形态有明显的影响,均匀温度冻土破坏呈“腰鼓”型。对比分析认为:本试验中冻土的温度场基本呈均匀状态,冻土的破坏同样近似为“腰鼓”型。

2.2 冻土的强度与破坏应变

冻土的单轴抗压强度,对于应变软化型和应变硬

化型两种情形, 可以分别取应力峰值和应变达到 15% 时对应的偏应力。而对于三轴卸围压冻土, 王大雁等^[9]指出: 三轴卸载条件下冻土应力 - 应变曲线类似双曲线, 具有理想刚塑性应力 - 应变曲线的特征, 冻土屈服强度即可看作是破坏强度, 此时对应的应变即是破坏应变, 可把各条曲线上最小应变速率所对应的偏应力点作为冻土的屈服强度。GURYANOV 等^[12]研究加卸载对人工冻土强度与变形的影响时, 也得出了类似结论。田怀植等^[13]研究发现, 高压作用下深部黏土冻结后卸载的应力 - 应变曲线没有明显的屈服点, 属于黏 - 塑性破坏类型, 取应变速率突变点作为屈服点, 对应点的屈服应力作为破坏应力。

本文试验过程中, 参照上述学者的研究经验, 选用应变速率突变点对应的偏应力, 作为冻土在恒轴压卸围压条件下的破坏强度, 该偏应力对应的应变即为破坏应变。

2.3 时间、应力因素试验结果分析

如图 4 (a)、(b) 所示为冻结温度 -5°C , 固结应力 8 MPa 时, 固结时间分别为 1, 7 d 条件下的冻结黏土卸围压应力 - 应变曲线、应变速率曲线。

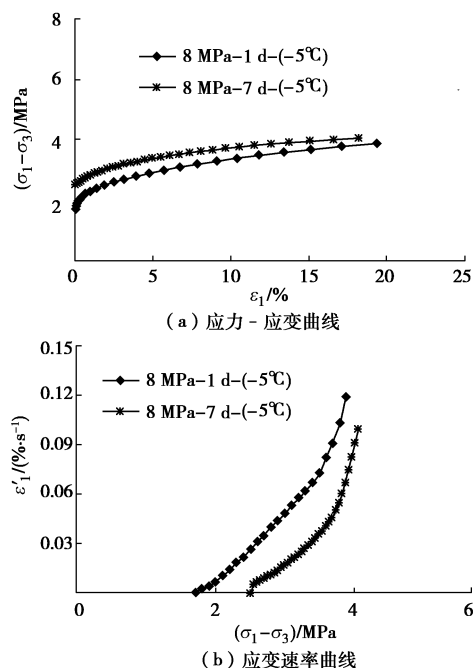


图 4 $T = -5^{\circ}\text{C}$ 土样的应力 - 应变及应变速率曲线

Fig. 4 Curves of stress-strain and strain rate-stress ($T = -5^{\circ}\text{C}$)

图 5 (a)、(b) 则是冻结温度 -10°C , 固结应力 8 MPa, 固结时间分别为 7, 28 d 条件下的冻结黏土卸围压应力 - 应变曲线、应变速率曲线。

图 6 (a)、(b)、(c)、(d) 分别是冻结温度 $T = -15^{\circ}\text{C}$, 固结应力分别为 $\sigma_1 = 8, 10 \text{ MPa}$, 不同固结时间的冻结黏土卸围压应力 - 应变曲线及应变速率曲线。

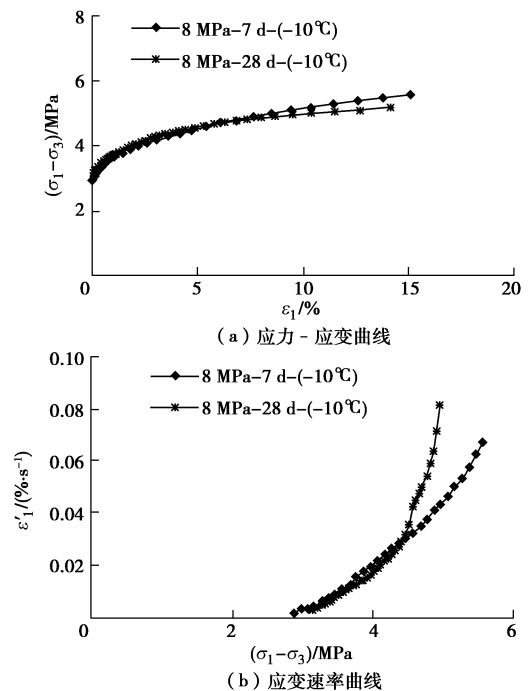
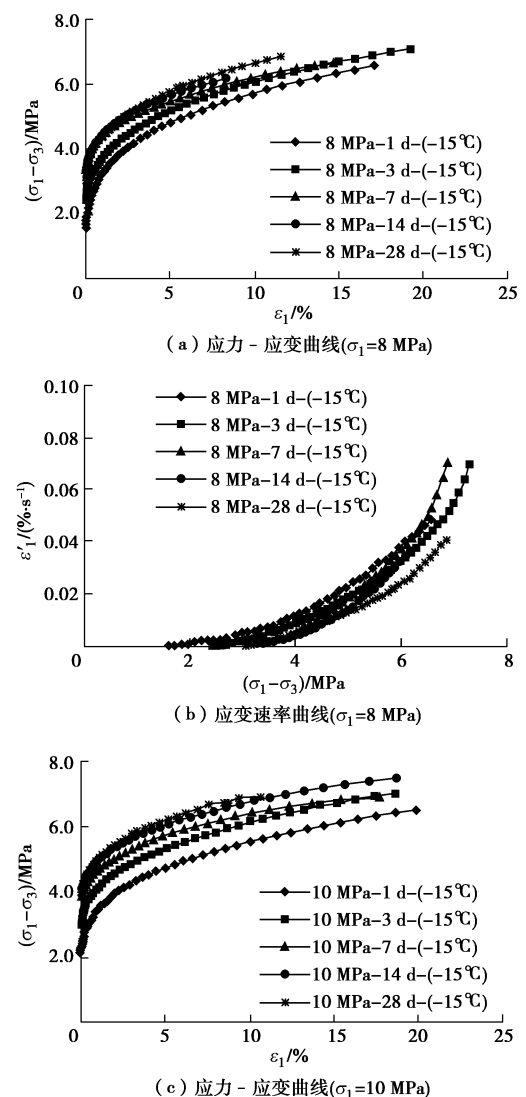


图 5 $T = -10^{\circ}\text{C}$ 土样的应力 - 应变及应变速率曲线

Fig. 5 Curves of stress-strain and strain rate-stress ($T = -10^{\circ}\text{C}$)



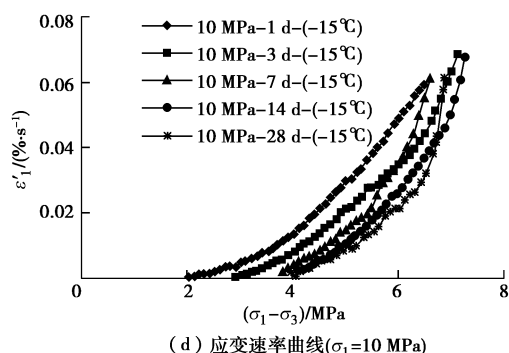


图 6 $T=-15^{\circ}\text{C}$ 土样的应力 - 应变及应变速率曲线

Fig. 6 Curves of stress-strain and strain rate-stress ($T=-15^{\circ}\text{C}$)

图 7 为固结时间 $t=7\text{ d}$, 冻结温度 $T=-20^{\circ}\text{C}$ 不同固结应力下冻土试样的应力 - 应变曲线及应变速率曲线。

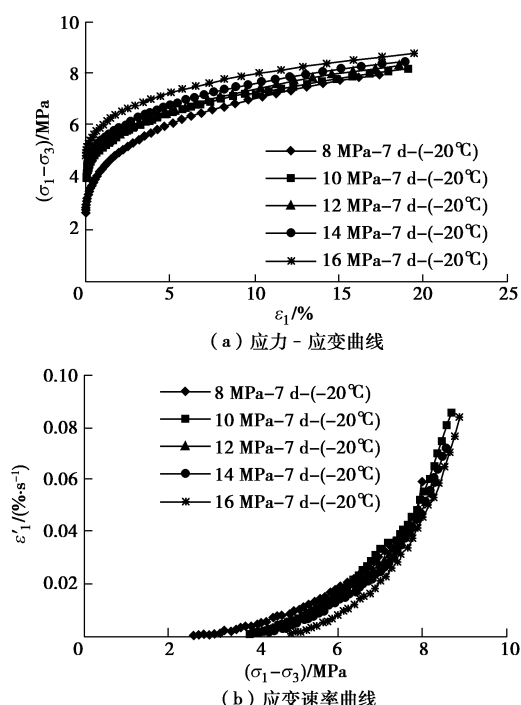


图 7 $T=-20^{\circ}\text{C}$ 土体应力 - 应变及应变速率曲线

Fig. 7 Curves of stress-strain and strain rate-stress ($T=-20^{\circ}\text{C}$)

土体恒轴压卸围压的过程, 相同的偏应力条件下土体发生的轴向变形越小说明土体抵抗变形的能力越强。观察上述应力应变曲线及应变速率曲线, 分析可得到以下结论:

(1) 不同固结时间土样的应力 - 应变曲线均呈非线性特征, 没有明显的弹性阶段和屈服点, 属于黏 - 弹塑性破坏类型。

(2) 冻结温度 -5°C 、 -10°C 、固结时间在 $1\sim 7\text{ d}$, 随着固结时间延长, 冻土抗变形能力增强较为明显; 固结时间在 $7\sim 28\text{ d}$, 随着固结时间延长, 冻土试样的抗变形能力受固结时间 t 的影响减小。

(3) 冻结温度 $T=-15^{\circ}\text{C}$ 的土样, 抗变形能力随固

结时间 t 的延长有所增强。固结时间在 $1\sim 7\text{ d}$, 土样抗变形能力受到固结时间 t 的影响较为明显; t 在 $7\sim 28\text{ d}$, 土样抗变形能力随固结时间的延长没有明显的变化。

(4) 冻土的抗变形能力与固结应力的关系受到固结时间的影响, 固结 1 d 土样抗变形能力与固结应力关系不明显, 固结 7 d 土样抗变形能力随固结应力增大而增强, 固结 $14\sim 28\text{ d}$ 土样抗变形能力不再受固结应力影响。表 3 为冻土三轴恒轴压卸围压试验所得不同固结应力、固结时间和冻结温度下的冻土力学参数。

根据所得试验参数, 获得图 8 (a)、(b) 为不同固结应力, $T=-15^{\circ}\text{C}$ 冻土的 $(\sigma_1-\sigma_3)_f-t$, ε_1-t 曲线。

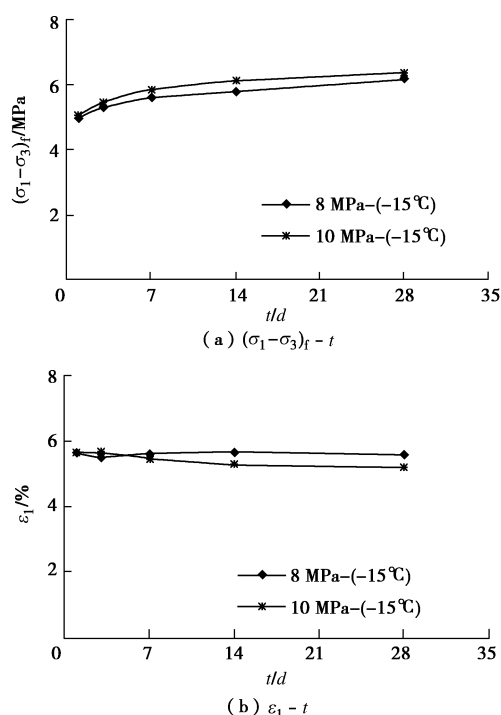


图 8 冻土强度、破坏应变与固结时间的关系曲线

Fig. 8 Relationship among strength-failure strain and consolidation time

图 9、图 10 分别为单位降温引起的土体强度增长率 $\frac{d(\sigma_1-\sigma_3)_f}{dT}$ 与固结应力 σ_1 及固结时间 t 的关系曲线。

根据试验结果所得的表 3、图 8~10 可得以下结论:

(1) 随着固结时间延长, 冻土的三轴卸围压强度有所增大, 固结时间较短为 $1\sim 7\text{ d}$ 时, 冻土的强度增长幅度较大, 随着固结时间的延长, 强度的增幅逐步趋于平缓。

(2) $T=-5^{\circ}\text{C}\sim -10^{\circ}\text{C}$ 的冻土试样, 随固结时间延长, 破坏应变减小, 变化幅度随固结时间延长亦逐渐减小; 当温度 T 降低至 -15°C 以下时, 冻土试样的破坏应变、受到固结时间的影响不明显。

表 3 固结条件和冻结温度下的冻土力学参数

Table 3 Mechanical parameters of frozen soils under different consolidation conditions and temperatures													
编号	T /℃	t /d	σ_1 /MPa	破坏强度/MPa	破坏应变/%	破坏应变速率/(%·s ⁻¹)	编号	T /℃	t /d	σ_1 /MPa	破坏强度/MPa	破坏应变/%	破坏应变速率/(%·s ⁻¹)
1	-5	1	8	3.18	7.83	0.057	13	-15	14	10	6.11	5.29	0.028
2		7		3.57	7.36	0.054	14		28		6.33	5.19	0.027
3	-10	7	8	4.58	5.42	0.033	15	-15	7	14	6.01	5.6	0.031
4		28		4.57	4.85	0.031	16				6.16	5.32	0.027
5	-15	1	8	4.96	5.65	0.025	17	-20	7	12	6.59	4.59	0.029
6		3		5.3	5.51	0.022	18				8	6.35	6.27
7	-15	7	8	5.58	5.6	0.028	19	-20	7	10	6.68	6.27	0.027
8		14		5.78	5.36	0.023	20				12	6.82	6.54
9	-15	28	8	6.16	5.58	0.022	21	-20	7	14	7.06	6.46	0.027
10		1		5.03	5.64	0.028	22				16	7.39	5.73
11	-15	3	10	5.44	5.64	0.028	23	-25	14	10	7.12	6.21	0.024
12		7		5.82	5.48	0.031	24				3	8	7.2

(3) 冻土的三轴卸围压强度随固结应力的增大而增大,且强度随固结应力的变化受到固结时间的影响。固结时间 t 在 1~14 d, 随着固结时间的延长冻土的三轴卸围压强度随固结应力增加的增长率逐渐增大, 固结时间大于 14 d, 随着固结时间的继续延长, 强度随固结应力的增长率不再发生变化。

(4) 如图 9, 固结应力在 8~16 MPa 之间时, 单位降温引起的冻土卸围压强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 变化速率不受固结应力的影响, 大小在 0.16~0.18 MPa·°C⁻¹ 之间。

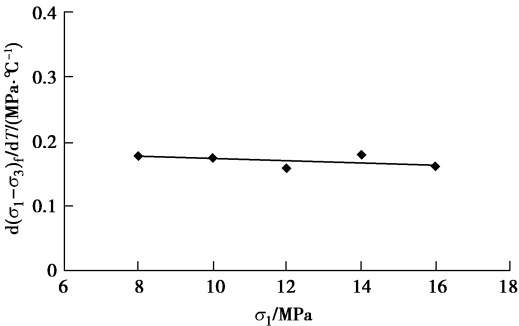


图 9 固结 7 d 冻土强度增长速率与固结应力的关系
Fig. 9 Relationship between strength growth rate and consolidation stress ($t=7$ d)

(5) 如图 10, 固结时间 1~7 d 时, 单位降温引起的冻土三轴卸围压强度增长率受固结时间的影响不明显, 在 0.16 MPa·°C⁻¹~0.18 MPa·°C⁻¹ 之间; 随着固结时间的进一步延长, 单位降温引起的冻土三轴卸围压强度增长率有所增大, 增幅明显。固结 14 d、28 d 冻土三轴卸围压强度随温度降低的增长速率分别为 0.26 MPa·°C⁻¹、0.31 MPa·°C⁻¹。

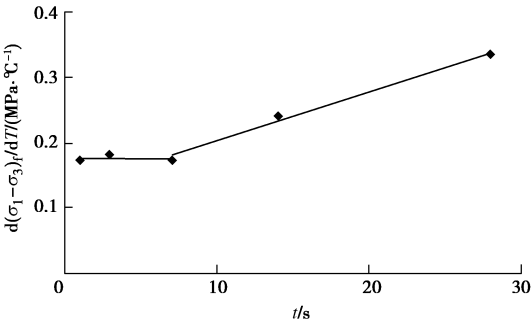


图 10 冻土强度增长速率与固结时间的关系
Fig. 10 Relationship between strength growth rate and consolidation time

3 应力 - 应变关系归一化分析

3.1 拟合函数的确定

本文的大量试验研究发现, 冻土变形特征受固结时间、冻结温度、固结应力等多种因素的影响, 但不同冻土试样在恒轴压卸围压路径下表现出的应力 - 应变行为仍有统一的规律。为此, 本文对不同固结时间的卸围压路径下冻土的应力 - 应变关系进行归一化研究。

基于试验结果, 绘制冻土试样在卸围压状态下 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 的关系曲线。以轴向变形 ε_1 为横坐标, 轴向应变与偏应力的比值 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为纵坐标作图, 由图 11 可以明显看出曲线类型接近于直线, 但是在曲线的前端仍然有明显的分段点, 故取相同的分段点, 分段进行拟合, 分段点前用二次函数进行拟合, 分段点后用线性函数进行拟合。

分段点前:

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_1^2 \quad (1)$$

表 4 $\sigma_1=8, 10$ MPa 试样应力 - 应变曲线的拟合参数
Table 4 Fitting parameters for stress-strain curves ($\sigma_1=8, 10$ MPa)

σ_1/MPa	t/d	a	b	c	b_I	a_I	$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ult}}/\text{MPa}$
8	1	0.094	0.3161	-0.0314	0.2029	0.3734	4.93
	3	0.0071	0.2764	-0.022	0.188	0.3978	5.32
	7	0.0052	0.2622	-0.0171	0.1836	0.3409	5.45
	14	0.0053	0.233	-0.0151	0.1753	0.1573	5.7
	28	0.0041	0.2406	-0.0177	0.1665	0.2106	6.0
10	1	0.0091	0.3036	-0.0255	0.1794	0.3832	5.57
	3	0.0064	0.2518	-0.0166	0.1636	0.3626	6.11
	7	0.0050	0.2271	-0.0126	0.1525	0.1971	6.56
	14	0.0048	0.2071	-0.0107	0.1519	0.2107	6.58
	28	0.0045	0.2069	-0.012	0.1500	0.1258	6.66

式中 ε_1 表示轴向应变; $\sigma_1-\sigma_3$ 表示偏应力; a, b, c 为试验参数。由式 (1) 得到

小, 受固结时间的影响不明显, 结论与试验规律相符。

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{\varepsilon_1}{a+b\varepsilon_1+c\varepsilon_1^2}, \tag{2}$$

分段点后:

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1-\sigma_3}=a_1+b_1\varepsilon_1. \tag{3}$$

式中 ε_1 表示轴向应变; $\sigma_1-\sigma_3$ 表示偏应力; a_1, b_1 为试验参数。由式 (3) 得到

$$\sigma_1-\sigma_3=\frac{\varepsilon_1}{a_1+b_1\varepsilon_1}. \tag{4}$$

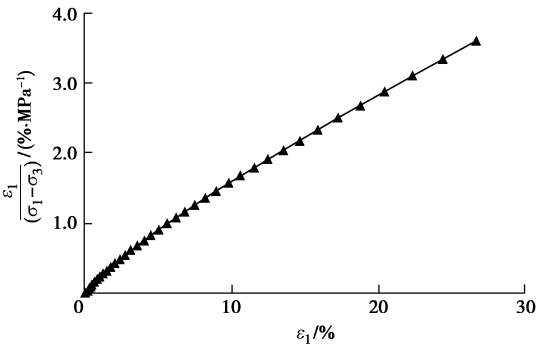


图 11 $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线
Fig. 11 Curves of $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon_1$

3.2 时间因素应力应变曲线回归

本文选取不同固结时间固结土体的应力 - 应变曲线进行回归, 对比归一化参数随固结时间的变化规律。

图 12 为固结应力 8, 10 MPa, 温度 -15℃, 不同固结时间土体的 $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线。

8, 10 MPa 固结, 温度 -15℃ 土体的曲线的分段点取 3%, 用式 (1)、(3) 分别对图 12 (a)、(b) 中曲线分段点前后段进行拟合, 得到的参数见表 4。

主应力差渐近值与固结时间的关系曲线如图 13。固结时间在 1~7 d 时, 主应力差的渐近值随固结时间延长而明显增大; 固结时间大于 7 d 时, 主应力差的渐近值随固结时间的延长虽然有所增大, 但是增幅很

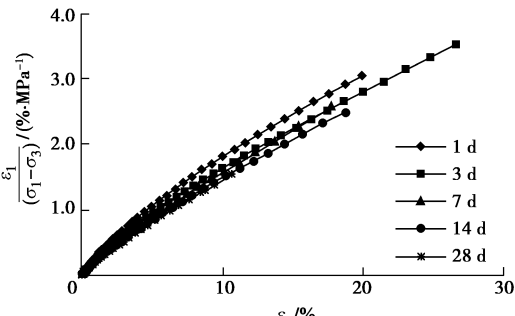
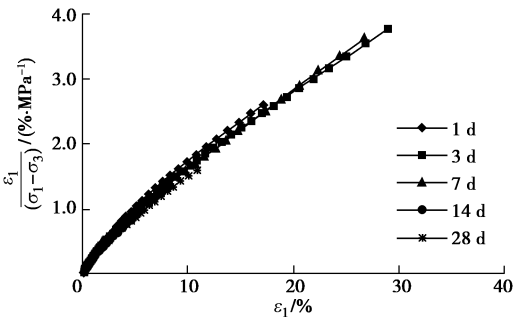


图 12 不同固结时间的 $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线 ($\sigma_1=8, 10$ MPa)
Fig. 12 Curves of $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) - \varepsilon_1$ under different consolidation time ($\sigma_1=8, 10$ MPa)

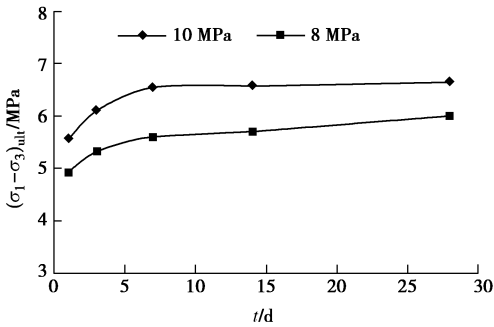


图 13 主应力差渐近值与固结时间的关系
Fig. 13 Relationship between initial tangent modulus and consolidation time

4 结 论

本文以取自深部地层的重塑黏土为研究对象, 基于“长时高压 K_0 固结—有载冻结—恒轴压卸围压”的试验模式, 开展了冻土的三轴卸围压强度试验研究, 主要得到以下结论:

(1) 卸围压路径下冻土试样的应力—应变关系均呈非线性特征, 没有明显的弹性阶段和屈服点, 总体趋势属于黏—弹塑性破坏类型。

(2) 在固结前期冻土的抗变形能力随固结时间的延长有所增强, 固结时间延长至 7 d 后, 土体抗变形能力不再随固结时间的延长而变化; -5°C 、 -10°C 的冻土试样, 随着固结时间的延长冻土的轴向破坏应变、轴向应变速率随之减小, 温度降低至 -15°C 或更低温度时, 土体破坏应变及其速率随固结时间延长变化不明显; 同时, 冻土的抗变形能力与固结应力的关系受到固结时间的影响, 固结初期土样抗变形能力与固结应力关系不明显, 随着固结时间的延长土样抗变形能力随固结应力增大而增强, 固结 14~28 d 之后土样抗变形能力不再受固结应力影响。

(3) 总体来看, 随着固结时间延长, 冻土的三轴卸围压强度有所增大, 固结时间为 1~7 d 时, 冻土的强度增长幅度较大, 随着固结时间的延长冻土强度的增幅逐步趋于平缓。

(4) 冻土的三轴卸围压强度随固结应力的增大而增大, 且强度随固结应力的变化受到固结时间的影响。固结时间 t 在 1~14 d, 随着固结时间的延长冻土的三轴卸围压强度随固结应力增加的增长率逐渐增大, 固结时间大于 14 d, 随着固结时间的继续延长, 强度随固结应力的增长率不再发生变化。

(5) 固结应力在 8~16 MPa 之间时, 单位降温引起的冻土三轴卸围压强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 增长率不受固结应力的影响; 固结时间 1~7 d 时, 单位降温引起的冻土三轴卸围压强度增长率受固结时间的影响不明显, 随着固结时间延长, 其强度增长速率增加, 且增幅明显。

(6) 本文选取不同固结时间固结土体的应力—应变曲线进行回归, 根据固结应力 8, 10 MPa, 温度 -15°C , 不同固结时间土体的 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线, 分段点取 3% 的情况下, 对曲线分段点前后段进行拟合, 固结时间在 1~7 d 时, 主应力差的渐近值随固结时间的延长明显增大; 固结时间大于 7 d 时, 主应力差的渐近值随固结时间的延长虽然有所增大, 但是增幅很小, 受固结时间的影响不明显, 此结论与试验结果相

吻合。

参考文献:

- [1] 马芹永. 人工冻结法的理论与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (MA Qin-yong. Theory and cinstruction technology of artificial freezing method[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 马 巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力—应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of tjaeles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 198 - 200. (in Chinese))
- [3] 许延春. 深部饱和黏土的力学性质特征[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 26 - 30. (XU Yan-chun. Mechanics characteristics of deep saturated clay[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 26 - 30. (in Chinese))
- [4] 李文平, 张志勇, 孙如华, 等. 深部黏土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1185 - 1190. (LI Wen-ping, ZHANG Zhi-yong, SUN Ru-hua, et al. High pressure K_0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1185 - 1190. (in Chinese))
- [5] 商翔宇. 不同应力水平深部黏土力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (SHANG Xiang-yu. Study on the mechanical properties of deep clay under various stress level[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [6] WATABE Y, TSUCHIDA T, ADACHI K. Undrained shear strength of pleistocene clay in Osaka Bay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 216 - 226.
- [7] 李海鹏, 林传年, 张俊兵, 等. 原状与重塑人工冻结黏土抗压强度特征对比试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(2): 2861 - 2864. (LI Hai-peng, LIN Chuan-nian, ZHANG Jun-bing, et al. Comparative testing study on strength behaviour of undisturbed and remolded frozen clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 2861 - 2864. (in Chinese))
- [8] 王衍森, 程建平, 薛利兵, 等. 冻结法凿井冻结壁内外部冻胀力的工程实测及分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 3(38): 303 - 308. (WANG Yan-sen, CHENG Jian-ping, XUE Li-bing, et al. In-situ measurements and analysis of

- frost-heave pressure inside and outside the ice wall during freeze sinking[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, **38**(3): 303 - 308. (in Chinese))
- [9] 王大雁, 马巍, 常小晓. K_0 固结后卸载状态下冻土应力-应变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(8): 1252 - 1256. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Study on behavior of stress-strain for frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(8): 1252 - 1256. (in Chinese))
- [10] 赵晓东, 周国庆, 陈国舟. 温度梯度冻结黏土破坏形态及抗压强度分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1856 - 1860. (ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, CHEN Guo-zhou. Failure modes and compression strength of frozen clay under thermal gradient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1856 - 1860. (in Chinese))
- [11] WANG D Y, MA W, WEN Z, et al. Study on strength of artificially frozen soils in deep alluvium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(4): 381 - 388.
- [12] GURYANOV I E, 马巍. 加荷与卸荷过程中冻土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1995, **18**(10): 53 - 57. (GURYANOV I E, MA Wei. Strength of frozen clay under loading and unloading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(1): 53 - 57. (in Chinese))
- [13] 田怀植, 王大雁, 马巍, 等. 高压作用下深部黏土冻结后卸载应力路径的力学性质研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(2): 351 - 357. (TIAN Huai-zhi, WANG Da-yan, MA Wei, et al. Study of the mechanical properties of frozen deep-buried clay under high pressures in unloaded state[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(2): 351 - 357. (in Chinese))

CNKI 推出《中国高被引图书年报》

日前, 中国知网 (CNKI) 中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》, 该报告基于中国大陆建国以来出版的 422 万余本图书被近 3 年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次, 分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍, 他们统计并分析了 2013 年—2015 年中国学术期刊 813 万余篇、中国博硕士学位论文 101 万余篇、中国重要会议论文 39 万余篇, 累计引文达 1451 万条。根据统计数据, 422 万本图书至少被引 1 次的图书达 72 万本。研制方根据中国图书馆分类法, 将 72 万本图书划分为 105 个学科, 分 1949-2009 年和 2010-2014 年两个时间段, 分别遴选被引最高的 TOP10% 图书, 共计选出 70911 本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示, 这 7 万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的 1.68%, 却获得 67.4% 的总被引频次, 可见这些图书质量上乘, 在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科 h 指数”排名前 20 的出版单位的评价指标, 对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发, 评价图书的学术影响力, 弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的遗憾, 科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创, 是全面、客观评价图书学术影响力的工具, 填补了目前图书学术水平定量评价的空白, 在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面, 均具有较强的参考价值, 也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物, 分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学 6 个分卷, 随盘赠送图书, 欢迎您咨询、订购。咨询电话: 010-82710850, 82895056 转 8599, email: aspt@cnki.net。