

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002012

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

张 遂^{1,2}, 匡 航³, 靳占英⁴, 徐国方^{1,2,5}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 4. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司, 安徽 合肥 230011; 5. 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: 为研究青藏高原粉质黏土在高含水量条件下的应力-应变特性, 本文对粉质黏土试样开展了较高含水量(15%, 30%, 50%)、不同温度(-2℃, -4℃)及围压(0.5, 1.0, 2.0, 4.0 MPa)条件下的三轴剪切试验, 分析了冻粉黏土试样应力-应变曲线的形态和强度规律, 并给出了机理性解释。试验结果表明: 冻粉黏土试样的应力-应变曲线均为应变软化型。高含水量下(50%), 试样的初始切线模量随围压增大呈幂函数形式增大。随着含水量的增大, 试样的破坏过程渐呈脆性。试样强度方面, 含水量的增大使冻粉黏土强度呈先减小后增大的规律, 即存在一个强度最不利含水量。此最不利含水量主要是由于土骨架与冰相的组合使系统处于“最弱结构”以及各组分在承受荷载时的主次地位变换而引起的。围压增大使冻粉黏土强度线性降低, 但降低幅度不大。结合 Mohr-Coulomb 准则的分析表明, 黏聚力是冻粉黏土强度的主要指标, 其值在最不利含水量时取得最小值, 围压对冻粉黏土强度的削弱作用也在此时得以突显。

关键词: 粉质黏土; 三轴试验; 剪切强度; 高含水量

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0116-09

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

ZHANG Sui^{1,2}, KUANG Hang³, JIN Zhanying⁴, XU Guofang^{1,2,5}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 4. China Railway 24th Construction Bureau Anhui Engineering Co. Ltd., Hefei, Anhui 230011, China; 5. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: To study the stress-strain characteristics of the Qinghai - Tibet silty clay with high moisture content, triaxial shear tests were conducted on the silty clay under relatively high moisture contents (15%, 30% and 50%), different temperatures (-2℃ and -4℃) and confining pressures (0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 MPa). The shape of the stress - strain curves and the strength characteristics of the frozen silty clay were analyzed and interpreted in mechanism. The test results show that the stress-strain curves of the frozen silty clay specimens are all of the strain-softening type. At high moisture content (50%), the initial tangential

收稿日期: 2020-02-15; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11702304; 41430634); 中国科学院率先行动“百人计划”项目资助(2018-040); 国家重点实验室开放基金项目资助(SKLFSE201714)

第一作者: 张遂(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事土体力学性质室内外测试等研究。

通讯作者: 徐国方(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土的力学特性及本构模型等研究。E-mail: gfxu@whrsm.ac.cn

modulus of the specimen increases with the confining pressure in the form of power function. With the increasing moisture content, the failure process of the specimens tends to be brittle. The continuous increase in moisture content causes the strength of the frozen silty clay to decrease first and increase subsequently, that is to say, there exists an unfavorable moisture content for the shear strength. The existence of the unfavorable moisture content is mainly due to the “weakest mass structure” composed of soil skeleton and ice and to the transition of the leading role of each composition in bearing the external load. With the increasing confining pressure, the shear strength of the frozen silty clay decreases linearly, but the variation range is not large. The analysis based on the Mohr-Coulomb criterion shows that the cohesion is the main constituent of the strength of the frozen silty clay. The cohesion reaches a minimum at the most unfavorable moisture content, at which the weakening effect of the confining pressure on the strength is also strengthened.

Keywords: silty clay; triaxial test; shear strength; high moisture content

在我国,多年冻土区和季节性冻土区面积分别占国土面积的 21.5% 和 53.5%^[1]。赵林等^[2]对青藏公路铁路沿线多年冻土层大量勘察资料仔细筛选,对其中的 697 个钻孔坡面的含冰量和地下冰分布状况进行了分析,结果表明青藏公路在穿越昆仑山区、可可西里山区以及风火山区的总长度达到 155.3 km,其中多年冻土区里程为 150.5 km,冻土平均厚度为 68.3 m。这些区域的冻土平均体积含冰量为 29.6%,平均最大体积含冰量为 75.0%。冻土层与冻区地下水位相互影响等原因,使高含冰量冻土长期广泛存在^[3-4],研究不同含冰量尤其是较高含冰量下冻土的力学性质对寒区工程的建设与维护具有重大意义^[5]。

针对冻土含水量与强度的关系,国内外许多研究者做了相关研究。Tsytoich 等^[6]在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的系列单轴压缩试验表明,冻结粉砂和黏土的无侧抗压强度随着含水量的升高先增大至某一最大值,而后随着含水量的进一步增大而逐渐减小。但对于粉土来说,这一在较高含水量下冻土强度随含水量下降的过程并不明显。Shusharina 等^[7]对接近饱和的亚黏土和黏土在温度为 $-10\sim -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行了单轴抗压试验,结果表明土体强度在含水量低于饱和度时随含水量增大,在饱和及过饱和时随含水量的增大而减小。吴紫汪等^[8]对兰州黄土的单轴试验也表明类似规律,最大抗压强度也在含水量接近饱和时取得。然而,马小杰等^[9]对高温-高含冰量($-0.3\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20%~120%)的冻结黏土单轴压缩试验却表明,在温度低于某一值时存在一个最不利含水率,使得试样的抗压强度最小。

上述试验可以看出,冻土强度与含水量关系的研究分歧主要在于含水量接近饱和的情况,且与土的种类及温度有关。同时也应注意到,上述试验大都为单轴压缩试验,并没有考虑围压等因素的影响。实际上,

围压对冻土力学性质的影响很大,且在各个阶段有不同的作用效果^[10]。另一方面,影响冻土力学性质的各条件如温度、含水率、应变率、围压等之间存在交互作用^[11-12]。因此,在分析含水量对冻土力学性质的影响时应尽可能考虑与之存在交互作用的因素^[13]。

赖远明等^[14]对超饱和砂土不同温度下的剪切试验表明,冻结砂土的强度特性与含水率的变化规律和试验温度有关。Enokido 等^[15]对冻结砂土进行了恒定温度及加载速率试验,给出了 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、200~300 kPa/s 条件下试样抗压强度与其含水量及干密度的规律公式。并得出过饱和时冻土强度随干密度增大而增大的结论。这些对于高含水量情况下冻土力学性质与含水量的关系研究考虑得到了温度和加载速率的影响,但都是过饱和含水量状态且都以砂土为实验对象。

本文以青藏高原红色粉质黏土为研究对象,开展了较高含水量下、不同温度和围压条件下的三轴剪切试验,分析了上述因素共同作用下高含水量冻结粉质黏土的应力-应变曲线规律,并结合微观机理作了讨论和解释。

1 试验介绍

1.1 试验土样

本次试验土样取自青藏高原北麓河试验站附近红色粉质黏土,土颗粒粒径级配如图 1 所示,其中黏粒 13%,粉粒 59.5%,砂粒 27.5%。试验测得该土样的液限为 $W_L = 31.87\%$,塑限为 $W_p = 17.44\%$,塑性指数 $I_p = 14.43$,饱和含水量约为 39%。

1.2 试样制备

制备质量含水量为 15%, 30%, 50% 的试样。制备试样时先将原状土碾碎,过 0.5 mm 筛后以 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

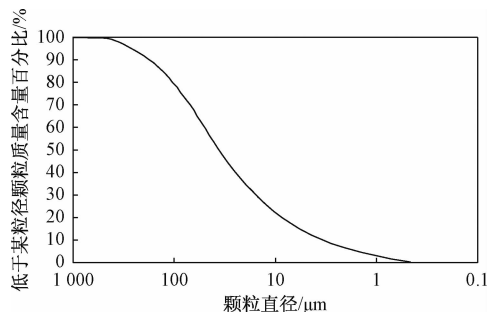


图1 试验土颗粒级配

Fig.1 Particle grading of the soil

烘干 24 h 备用。再依公式 $m_s = m/(1+w)$ 和 $m_w = mw/(1+w)$ 算得配制目标试样所需的土颗粒及水的质量(式中 m 为目标试样的质量, W 为试样初始含水量, m_s 和 m_w 分别为土颗粒和水的质量)。加水配至目标含水量后,将试样连同模具一起放入制冷冰箱,使其在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中迅速多向冻结,从而获得较均匀的试样。冻结 48 h 后脱模,制成直径 61.8 mm、高 125 mm 的不同含冰量的圆柱体试样,并套入橡皮膜置于对应试验温度下恒温 12 h 以上,以备试验。

经计算,可得本次试验中土样的干密度分别为 1.90, 1.51 及 1.15 g/cm^3 。结合其他研究者对同类土试验的数据^[9],可以发现试样干密度随初始含水量的升高而降低,且有很好的对数相关性(图 2)。

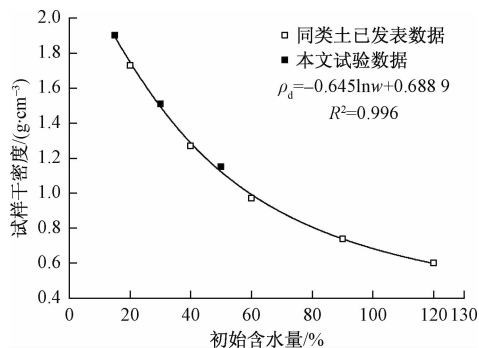


图2 土样含水量与干密度的关系

Fig.2 Relationship between water content and dry density

1.3 试验仪器与方法

本试验所用仪器为冻土工程国家重点实验室自主研发的多功能环境材料试验机。该仪器在轴向荷载、温度、位移、围压和体变方面的测量精度分别为 1 N, $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 mm, 1 kPa 和 1 mm^3 。

试验时,将带橡皮膜的试样装入试验机的压力舱并封闭,通过预冷的液压油提供温度和围压环境,通过热敏探头测量油温并调节至目标温度,使温度波动范围小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。恒温 3 h 后,试样温度基本稳定。在

保持试验围压不变的情况下,以 $1.25\text{ mm}/\text{min}$ 的加载速率对试样进行轴向加载,直至试样轴向应变达到 20%。在整个试验加载过程中,记录轴向压力、轴向变形、径向应力和液压油体积变化。

试验中偏应力由轴向压力除以试样横截面积再减去围压求得。由于试样在加载过程中会发生变形,因此在计算偏应力时需要对试样横截面积进行修正。考虑到体积应变相比截面积应变为高阶小量,在截面积修正过程中暂不考虑试样的体变,且假设试样变形是均匀的,通过试样轴向尺寸变化求修正后的横截面积 S ,进而修正偏应力,过程如下:

$$S = \frac{S_0 \cdot H_0}{H_0 - \Delta H}, \quad q = \frac{T}{S} - p_0$$

式中: S_0, H_0 ——试样初始时的截面积和高度;

ΔH ——高度压缩量;

S ——修正后横截面积;

T ——轴向荷载;

p_0 ——围压;

q ——修正后的偏应力。

本次试验条件采用 2 个温度: $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 个含水量: 15%, 30%, 50%; 4 个围压: 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 MPa, 共计 24 组试验进行。

2 试验结果及分析

本部分分析了不同试验条件下冻结粉质黏土的应力-应变曲线形态及强度特性。通过分析应力-应变曲线形态,得到了不同试验条件(温度、初始含水量、围压)对试样应力-应变关系的影响,包括试样软化特征、初始切线模量变化及试样达到破坏强度后的应力衰减规律。通过分析不同试验条件下的强度曲线,得到了不同含水量及围压对冻土强度的影响规律,并从细观机理角度对这些试验结果作出了相应解释。

2.1 应力-应变曲线形态

土体作为散体材料,变形主要是由颗粒间的相对位移引起的。严格来说,土体在加载过程中始终会产生不可恢复的变形。但为便于分析,常结合应力-应变曲线特征作相应简化。如图 3 中,屈服应变 ε_y 之前应力-应变曲线近似为直线,此过程中试样以弹性变形为主。破坏应力 σ_f 和屈服应力 σ_y 之间的变形阶段是试样发生显著塑性变形的过程, $\Delta\varepsilon$ 的大小反映了试样破坏前塑性变形的程度。

表 1 及图 4 分别对不同试验条件下试样的强度和应变结果进行了整理和展示,可以看出, $\Delta\varepsilon$ 及 $\Delta\varepsilon$ 随

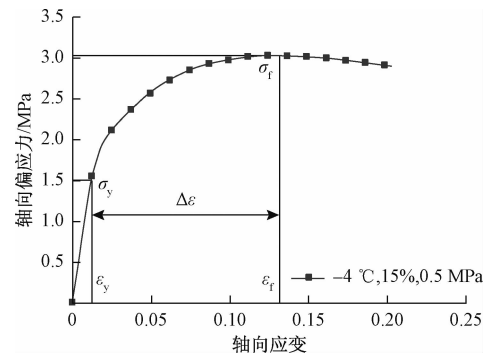


图 3 土样的屈服极限和破坏极限

Fig. 3 Yield limit and damage limit of the specimen

着围压及含水量的升高呈减小的趋势。这说明围压和含水量的升高使冻土破坏前的塑性变形减少了。这种现象可能与试样破坏过程中土颗粒间挤密、剪缩等引起强度增长的变形过程缩短有关,而颗粒破碎、胶结断裂等在试样破坏前能够以较小的变形提供较大的抗剪强度,所以宏观上表现为土体破坏变形越来越小。另外,本试验中试样的应力-应变曲线均为应变软化型,这一特点也随着含水量和围压的增大变得愈加明显。

表 1 不同试验条件下试样的强度及应变

Table 1 Strength and strain of the specimens under different test conditions

温度/ ℃	含水 量/%	围压/ MPa	σ_y / MPa	ε_y / %	σ_t / MPa	ε_t / MPa	$\Delta\varepsilon$ / %	$\bar{\Delta\varepsilon}$ / %
-2	15	0.5			2.25	12.4		
		1.0			2.05	11.1		
		2.0			2.05	9.3		
		4.0			1.49	8.9		
	30	0.5	0.92	0.8	1.18	10.3	9.5	5.75
		1.0	0.90	1.4	1.08	8.7	7.3	
		2.0	0.85	2.0	0.99	6.7	4.7	
		4.0	0.80	1.0	0.84	2.5	1.5	
	50	0.5	1.40	1.8	1.49	2.8	1.0	1.05
		1.0	1.22	2.5	1.31	3.7	1.2	
		2.0	1.22	1.1	1.29	1.2	0.1	
		4.0	0.69	0.5	0.93	2.4	1.9	
-4	15	0.5	1.50	1.2	3.03	13.1	11.9	
		1.0	1.21	0.9	2.93	12.8	11.9	
		2.0	0.55	0.2	2.89	10.9	10.7	
		4.0	0.55	0.2	2.58	8.9	8.7	
	30	0.5	1.78	1.8	2.03	6.0	4.2	3.33
		1.0	1.70	1.7	1.96	5.8	4.1	
		2.0	1.73	1.0	1.96	4.1	3.1	
		4.0	1.63	1.1	1.85	3.0	1.9	
	50	0.5	2.08	1.6	2.29	3.1	1.5	1.13
		1.0	2.04	1.5	2.38	2.9	1.4	
		2.0	2.04	1.0	2.38	2.4	1.4	
		4.0	2.00	2.4	2.09	2.6	0.2	

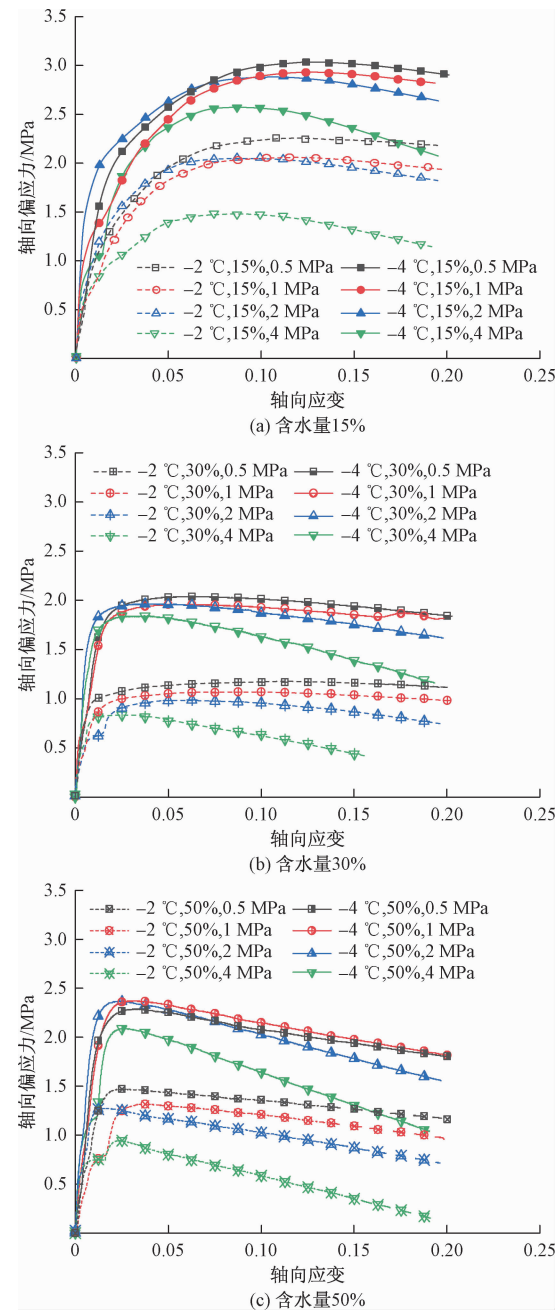


图 4 不同含水量各温度及围压下冻粉黏土应力-应变关系
Fig. 4 Stress-strain relationship diagram of the frozen silty clay with different water content at different temperatures and confining pressures

2.1.1 初始切线模量

对不同试验条件下试样的初始切线模量分析发现,较低温度试样的初始切线模量较高,较高含水量(50%)下冻土初始切线模量随围压增大呈幂函数关系增大(图 5)。

温度对冻土切线模量的影响与土体中冰透镜体的含量及冰胶结键的强度有关。同一土样,温度越低,冻

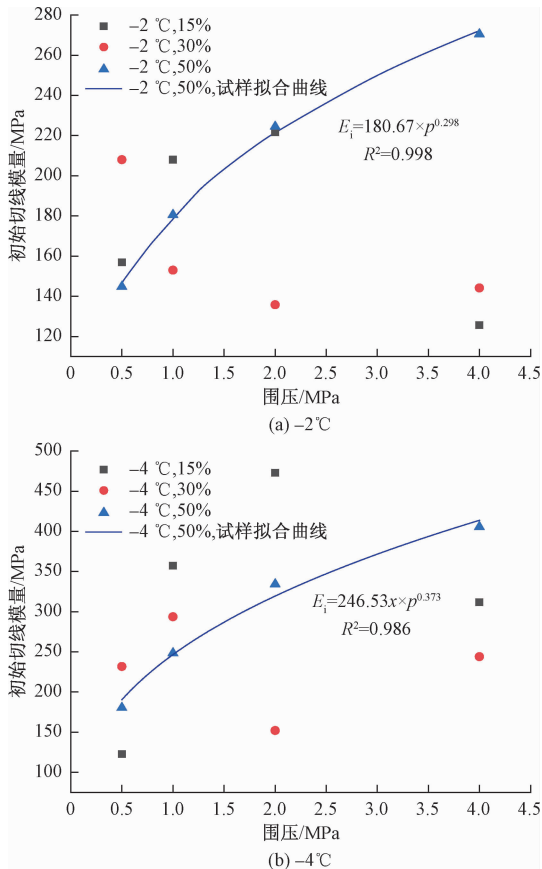
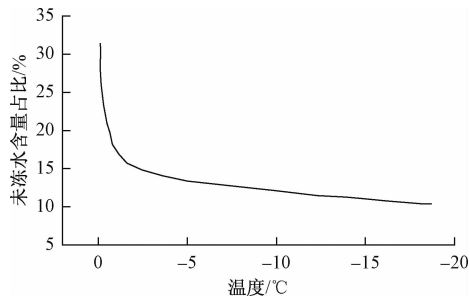


图5 不同围压下初始切线模量

Fig.5 Initial tangential modulus under different confining pressures

土中冰的含量越高。这使得土颗粒间空隙减少,压缩性降低,同时冰胶结键得到加强,所以冻土模量随温度降低而增大。Zhang 等^[16]对本试验土样地区含水量为 31.82% 的粉黏土试验表明,0 ~ -5 °C 时土体中水分随温度降低冻结较快,未冻水含量迅速降低(图 6)。本试验中 2 个温度 -2 °C 和 -4 °C 正处于未冻水含量对温度变化较敏感的区间,故而初始切线模量有差异。

图6 粉黏土未冻水含量与温度关系^[16]Fig.6 Relationship between unfrozen water content and temperature in the silty clay^[16]

围压对试样初始切线模量的作用则可以作如下的解释。冻土体抵抗变形的能力主要由土体和冰提供。围压的增长一方面使得土颗粒挤密,另一方面造成冰的受压融化。前者使土体变形模量提高,后者则有削弱作用。由于围压对冻土中未冻水含量的影响系数相对较小^[17](冻结温度随压力增长按约 -0.075 °C/MPa 斜率线性降低),试验中冻土的压融现象只在应力集中区域发生。应力集中在试样加载过程中始终存在,所以压融现象始终存在,只是初始加载阶段发生的相对较少。50% 含水量试样中试样干密度小,围压的挤密作用相对压融作用对初始切线模量的影响占优势,故初始切线模量随围压增大而提高。对于较低含水量试样,其本身干密度较大,初始加载时压力又较小,挤密作用相对压融作用对试样抵抗变形能力的影响不再占优势,围压增长对土体切线模量的两种相反作用同时彰显,导致此时切线模量与围压的关系复杂。有关初始含水量与围压的研究,Diekmann^[18]对冻结砂质粉土的试验及 Lade 等^[19]的试验也得到类似的幂函数规律。

2.1.2 峰后曲线

由图 7、图 8 可知,试样破坏之后的应力-应变关系受含水量和围压影响,随着含水量和围压的增大,应力-应变曲线峰后切线斜率(负值)逐渐减小,即应力达到峰值之后随应变降低的速率逐渐变快,破坏过程更显脆性。

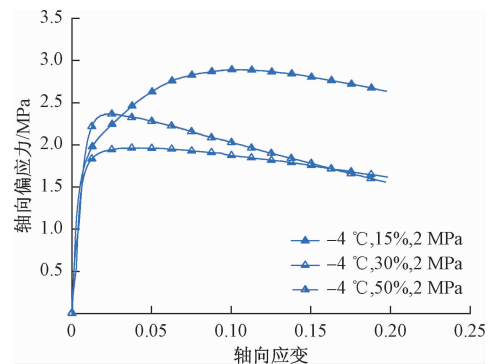


图7 -4 °C, 2MPa 围压下各含水量冻粉黏土应力-应变关系
Fig.7 Stress-strain relationship of the frozen silty clay with different water content at temperature of -4 °C and confining pressure of 2 MPa

试样应力达到峰值之后的变化速率主要在于试样中微裂隙发展形成破裂面的速率。冻土中原本作为土体结构的冰转变为未冻水会加快裂隙的发展。而高围压和高含水量的条件则分别加强了这一转变的过程和影响。因此,随着含水量和围压的增大,冻土的应力峰

后曲线下降逐渐迅速。牛亚强等^[20]对粉质黏土的三轴试验结果表明,随着含水量和围压的增大,试样的应力-应变曲线逐渐从应变硬化型转化为应变软化型,峰后曲线变化规律与本试验基本一致。

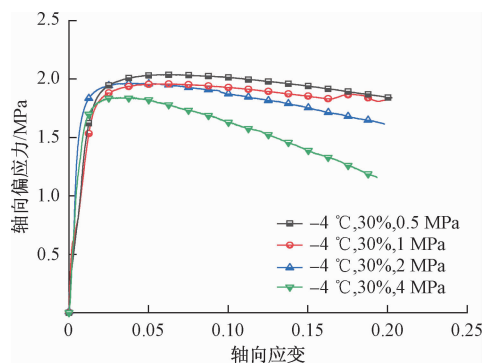


图8 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30%含水量下各围压冻粉黏土应力-应变关系

Fig.8 Stress-strain relationship of the frozen silty clay with different confining pressures at temperature of $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and water content of 30%

2.2 强度特性

冻土强度特性是冻土力学研究中的重要内容,本节以最大轴向偏应力作为试样强度,分析了含水量、温度及围压对冻土强度的影响规律及原因,并通过Mohr-Coulomb准则的参数变化规律加以讨论。

2.2.1 含水量对剪切强度的影响

不同含水量试样的破坏强度曲线如图9所示,可以发现,30%含水量试样的剪切强度比15%含水量试样强度有明显的降低,含水量增至50%时,试样强度稍有回升。不同温度和围压下这一规律均成立。即总存在一个30%左右最不利含水量,使得冻结黏土剪切强度在此含水量时最小。

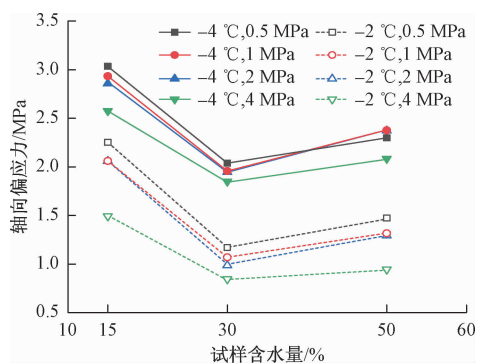


图9 冻粉黏土强度与含水量的关系

Fig.9 Relationship between strength of the frozen silty clay and water content

由于总含水量对冻土中未冻水含量影响很小,因

而同一条条件下,初始含水量越高,可冻结为冰的水也越多,冻土含冰量越大^[21]。另一方面,含水量升高将使土体干密度降低(图2),土骨架变得相对稀疏。基于以上两点作如下推测:当初始含水量较低时(15%),冻土中的冰主要以晶体形式存在于孔隙中,外荷载主要由土骨架承担。随着含水量的升高,越来越多的土骨架被强度较低的或连续或离散的冰相代替,冻土强度降低;而当含水量增大到一定程度后,冻土中的冰与土颗粒对冻土强度发挥的作用相当。随着含水量的继续增大(30%左右),冻土中土颗粒和冰的含量一消一长,直至土骨架与冰相组成一个“最弱结构”,冻土强度减至最小;进一步地,当含水量继续增大(50%),土颗粒开始“悬浮”在冰相中,冰相将进一步增多进而连成整体,冻土强度出现有限的回升,并逐渐趋于冰的强度。

2.2.2 温度对剪切强度的影响

由实验结果可以看出(表1、图4), $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时试样强度明显大于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的试样强度,冻土强度随温度降低而增大的主要原因是冻土中不同结合状态的水逐渐达到凝固点,持续冻结成冰,进而导致冻土中未冻水减少,冰胶结作用增强。许多研究者的试验结果已证实冻土强度随温度的变化规律^[6,22],并给出了相应的关系式。这些关系式均可概况为幂函数形式,且幂函数的指数因试验对象和条件的不同而略有差异,但都在0.44~1之间^[23]。

2.2.3 围压对剪切强度的影响

围压与试样强度间的关系受其它试验条件的影响,如初始含水量和温度。本次试验结果显示,总体上试样强度随围压升高逐渐降低。从变化范围上看, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时围压对强度的影响相对 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时较小。从趋势上看,试样强度与围压有较好的线性关系(图10,表2)。

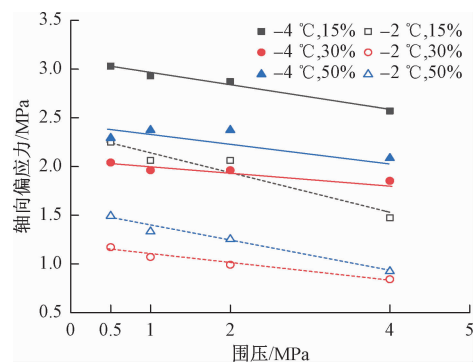


图10 冻粉黏土强度与围压的关系

Fig.10 Relationship between strength of the frozen silty clay and confining pressure

表 2 冻粉黏土强度与围压的线性回归分析

Table 2 Linear regression analysis of strength and confining pressure of the frozen silty clay

试验条件	a (斜率)	b (截距)	R^2
-2℃, 15%	-0.203 8	2.342 2	0.912 7
-2℃, 30%	-0.091 7	1.194 3	0.966 4
-2℃, 50%	-0.147 1	1.530 9	0.912 7
-4℃, 15%	-0.123 3	3.088 7	0.966 4
-4℃, 30%	-0.045 9	2.036 1	0.912 7
-4℃, 50%	-0.065 0	2.413 5	0.601 6

围压对冻土强度的主要影响有挤密和压融两方面,分别起到增强和削弱冻土强度的作用。不同围压水平下这两种作用各占主导地位,一般冻土强度随围压先升高后降低。所谓界限围压^[10],即这两种作用达到平衡时的压力水平。受初始含水量和干密度的影响,界限围压的具体数值会有不同。牛亚强^[20]等人对不同含水量冻土强度随围压的变化规律做了实验,得到了三种不同的变化形式。这可能是由于含水量的不同导致了界限围压的不同。随着初始含水量的升高,初始干密度逐渐降低,界限围压逐渐降低。三种变化形式实际上是试验围压低于界限围压时、包含界限围压时、大于界限围压时的三阶段规律。

本试验中,试验温度较高,含水量尤大,压融现象容易发生,可以推断界限围压较低,即本试验中的围压大于界限围压。此时,与围压的压密强化作用相比,压融削弱对冻土强度影响更大。因而冻土强度随围压升高略有下降。又由于压融的本质是使应力集中区的冰熔点升高,故试样在-4℃时相对-2℃时压融影响较小,宏观体现为围压对强度影响较小,在图10中表现为-4℃的趋势线相较-2℃时更平缓。

2.2.4 结合 M-C 理论的强度分析

考虑到试验中的围压与强度间较强的线性关系,对实验结果结合 M-C 强度准则作了分析。应力圆图形及相关参数如图11、图12所示。

应当注意的是,这里的 c, k 值的意义与融土中稍有不同。将冻土强度按是否受围压影响分为两部: c 表示没有围压条件下的强度,体现了冻土的结构性与黏结力。“ kP ”则作为一个整体,综合表现了围压对冻土强度的影响。系数 k 除了包含“摩擦角”的影响外,还包含围压对冻土的挤密及压融作用等。也正因此,所得 k 值才可能为负值,其值在 $-0.11 \sim 0$ 之间。

比较各含水量试样可以看到, c 值随含水量变化与强度随含水量有相似的关系(图9、图12),也是先降低后增长。这说明冻土强度问题中的最不利含水率

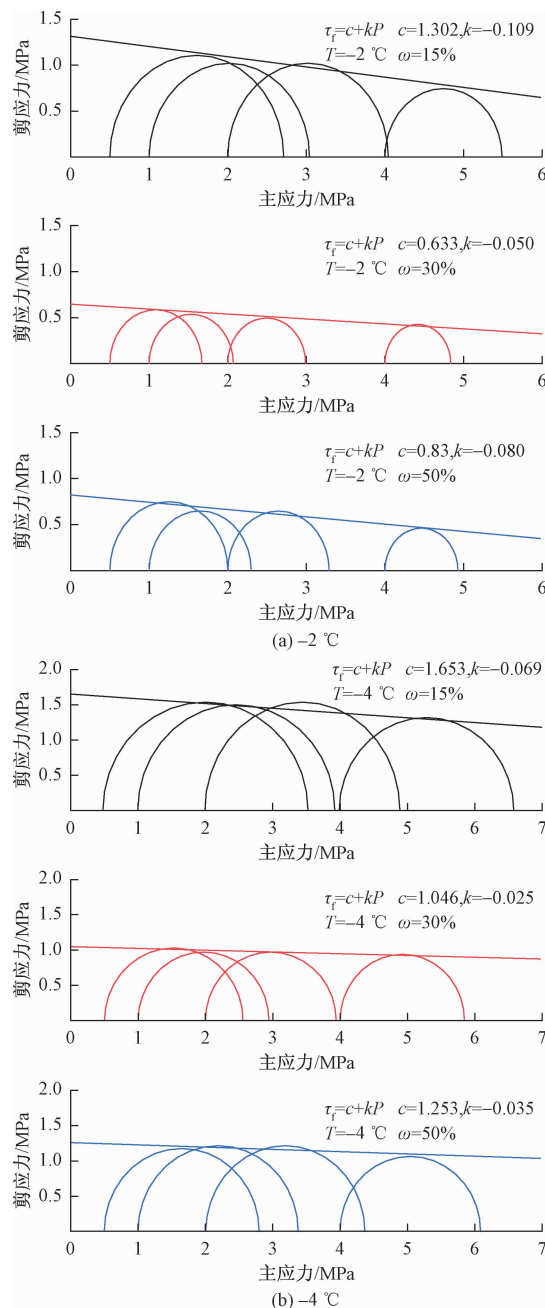


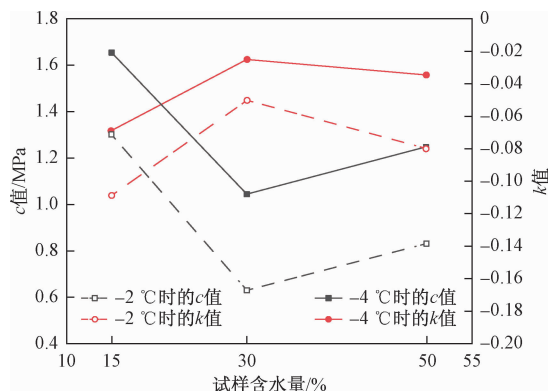
图 11 不同温度各含水量试样强度 M-C 分析

Fig. 11 M-C analysis of the strength of the samples with different water content and temperatures

确实是通过影响冻土结构性进而影响强度的,前文中的分析是合理的。 k 值综合表达了围压对冻土抗剪强度的影响系数,且在 30% 含水量时其绝对值达到最大(图12),说明围压对冻土强度的弱化作用在最不利含水率时得到加强。

3 结论

(1) 试验条件下,随着试样含水量与围压的增大,

图 12 试样的 c, k 值与含水量的关系Fig. 12 Relationship between c & k values of the samples and water content

冻结粉质黏土的应力-应变曲线逐渐表现出越来越明显的应变软化特征,且随应变增大应力降低的速率逐渐变快。

(2)较高含水量下(50%),冻结粉质黏土试样应力-应变曲线的初始剪切模量随围压增大呈幂函数形式增长。

(3)冻结粉质黏土的剪切强度随围压的增大而线性降低,但降低幅度不大;随初始含水量的增大表现出先降低后升高的特性,在30%左右存在一个对应土-冰体系“最弱结构”的最不利含水量。

参考文献 (References):

- [1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. [XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)]
- [2] 赵林,吴通华,谢昌卫,等. 多年冻土调查和监测为青藏高原地球科学研究、环境保护和工程建设提供科学支撑[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(10): 1159-1168. [ZHAO L, WU T H, XIE C W, et al. Support geoscience research, environmental management, and engineering construction with investigation and monitoring on permafrost in the Qinghai-Tibet plateau, China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(10): 1159-1168. (in Chinese)]
- [3] 程国栋,金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11. [CHENG G D, JIN H J. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and its changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11. (in Chinese)]
- [4] 金会军,王绍令,俞祁浩,等. 青藏工程走廊冻土环境工程地质区划及评价[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 66-71. [JIN H J, WANG S L, YU Q H, et al. Regionalization and assessment of environmental geological conditions of frozen soils along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 66-71. (in Chinese)]
- [5] 李永春,鱼海麟,解宏伟. 青藏铁路多年冻土地段的地质环境和工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 45-48. [LI Y C, YU H L, XIE H W. Geological environment and engineering geology of permafrost section of Qinghai-Tibet Railway [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(1): 45-48. (in Chinese)]
- [6] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆,朱元林,译. 北京: 科学出版社, 1985. [ЧЪЛТОВИЧ, Н. А. Frozen soil Mechanics [M]. ZHANG C Q, ZHU Y L, translate. Beijing: Science Press, 1985.]
- [7] SHUSHERINA E P, BOBKOV Y P. Effect of Moisture Content on Frozen Ground Strength [M]. Technical Translation National Research Council Canada, 1978.
- [8] 吴紫汪,马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. [WU Z W, MA W. Strength and creep of frozen soil [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. (in Chinese)]
- [9] 马小杰,张建明,常小晓,等. 高温-高含冰量冻结黏土强度试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2498-2502. [MA X J, ZHANG J M, CHANG X X, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2498-2502. (in Chinese)]
- [10] 马巍,吴紫汪,盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 7-11. [MA W, WU Z W, SHENG Y. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 7-11. (in Chinese)]
- [11] 李顺群,高凌霄,柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1173-1177. [LI S Q, GAO L X, CHAI S X. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1173-1177. (in Chinese)]

- [12] 齐吉琳,党博翔,徐国方,等. 冻土强度研究的现状分析[J]. 北京建筑大学学报, 2016, 32(3): 89-95. [QI J L, DANG B X, XU G F, et al. A state of the art for strength of frozen soils[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016, 32(3): 89-95. (in Chinese)]
- [13] 张雅琴,杨平,江汪洋,等. 粉质黏土冻土三轴强度及本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊1): 8-15. [ZHANG Y Q, YANG P, JIANG W Y, et al. Study on triaxial strength and constitutive model of frozen silty clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Sup 1): 8-15. (in Chinese)]
- [14] 赖远明,张耀,张淑娟,等. 超饱和含水量和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3665-3670. [LAI Y M, ZHANG Y, ZHANG S J, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3665-3670. (in Chinese)]
- [15] ENOKIDO M, KAMETA J. Influence of water content on compressive strength of frozen sands[J]. Soils and Foundations, 1987, 27(4): 148-152.
- [16] ZHANG M Y, ZHANG X Y, LU J G, et al. Analysis of volumetric unfrozen water contents in freezing soils[J]. Experimental Heat Transfer, 2019, 32(5): 426-438.
- [17] 张立新,徐学祖,张招祥,等. 冻土未冻水含量与压力关系的实验研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 28-31. [ZHANG L X, XU X Z, ZHANG Z X, et al. Experimental study of the relationship between the unfrozen water content of frozen soil and pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 28-31. (in Chinese)]
- [18] DIEKMANN N, JESSBERGER H L. Creep behavior and strength of an artificially frozen silt under triaxial stress state[C] //Proceedings of 3rd International Conference on Ground Freezing, Hanover, 1982:42.
- [19] LADE P V, JESSBERGER H L, DIEKMANN N. Stress-strain and volumetric behavior of frozen soils. [C]//Second International Symposium on Ground Freezing, Trondheim, Norway, 1980: 48-64.
- [20] 牛亚强,赖远明,王旭,等. 初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 499-506. [NIU Y Q, LAI Y M, WANG X, et al. Research on influences of initial water content on deformation and strength behaviors of frozen silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 499-506. (in Chinese)]
- [21] 赵淑萍,马巍,郑剑锋,等. 冻土破坏的宏观表现和细观机理[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集, 2007: 329-335. [ZHAOS P, MA W, ZHENG J F, et al. Macroscopic manifestation and meso-mechanism of frozen soil failure[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 10th Chinese Academy of Civil Engineering and Geotechnical Conference, 2007: 329-335. (in Chinese)]
- [22] ZHU Y L, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9(1): 3-15.
- [23] 徐国方. 冻土的力学性质及其亚塑性本构模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012. [XU G F. Mechanical properties and hypoplastic constitutive study of frozen soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)]

编辑:张明霞