

DOI:10.11918/202301046

高温高含冰量冻结砂土的三轴压缩力学特性

马付龙^{1,2}, 刘恩龙^{1,3}, 王丹¹, 康建^{1,2}, 宋丙堂¹

(1. 冻土工程国家重点实验室(中国科学院西北生态环境资源研究院), 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 为深入研究高温高含冰量冻土的力学特性与变形机制, 以不同含冰量的冻结砂土为研究对象, 通过开展 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的三轴压缩试验, 讨论了围压和含冰量对冻结砂土力学特性的影响, 并分析了常规饱和冻土与高含冰量冻土在变形机制上的差异。结果表明: 针对砂土提出的“冰砂混合, 分层压实, 下部补水”的制样方法可制出土颗粒分布均匀的高含冰量饱和冻土试样; 高含冰量冻结砂土与饱和冻结砂土的强度和体变差异很大, 但不同含冰量的高含冰量冻结砂土的应力-应变关系和体变很接近; 不同围压下的 67% 含冰质量分数冻结砂土均为应变软化型, 且随着围压的增大, 试样应变软化的程度逐渐降低, 体变逐渐由体胀向体缩转化; 饱和冻结砂土受力时是由土颗粒、冰和未冻水共同承担; 而高含冰量冻结砂土主要由冰直接承担外力, 冰中夹杂的土颗粒间接地影响了冰的力学性质。

关键词: 高温高含冰量冻土; 砂土; 三轴试验; 力学特性; 变形机制

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)07-0124-08

Experimental study on triaxial compression mechanical characteristics of warm and ice-rich frozen sand

MA Fulong^{1,2}, LIU Enlong^{1,3}, WANG Dan¹, KANG Jian^{1,2}, SONG Bingtang¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences), Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The mechanical characteristics of warm and ice-rich frozen sand are the key and difficult problems in frozen soil engineering. In order to study the frozen sand with different ice contents, triaxial tests at $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ were carried out on conventional saturated frozen sand and ice-rich frozen sand. Based on the experimental results, the effects of confining pressure and ice content on the mechanical characteristics of frozen sand are discussed. And the differences in deformation mechanisms between conventional saturated frozen sand and ice-rich frozen sand are analyzed. The results show that: the proposed method of "mixing ice particles and sand, compacting in layers, and replenishing water from below" can make ice-rich frozen sand with uniform distribution of soil particles. The strength and volumetric strain of ice-rich frozen sand differ greatly from conventional saturated frozen sand, but the stress-strain relationship and volumetric strain of ice-rich frozen sand with different ice contents are very close. The ice-rich frozen sand with 67% ice content under different confining pressure are strain-softening type; and with the increase of confining pressure, the degree of strain-softening gradually decreases, and the volumetric strain gradually transforms from volumetric dilation to volumetric contraction. The external force on conventional saturated frozen sand is shared by soil particles, ice and unfrozen water, while the external force on the ice-rich frozen sand is mainly borne directly by ice, in which the entrained soil particles indirectly affect the mechanical characteristics of ice.

Keywords: warm and ice-rich frozen soil; sand; triaxial test; mechanical characteristics; deformation mechanism

高温冻土是指含有较多的未冻水且冻结状态下具有较大压缩性的土, 也称为塑性冻土^[1]。而高温

高含冰量冻土指的是超过饱和含水率的高温冻土。区别于低温冻土, 高温高含冰量冻土主要有含冰量

收稿日期: 2023-01-13; 录用日期: 2023-02-27; 网络首发日期: 2024-05-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240516.1419.002>

基金项目: 国家自然科学基金(41771066); 冻土工程国家重点实验室自主研究课题(SKLFSE-ZQ-202206, SKLFSE-ZT-202213)

作者简介: 马付龙(1994—), 男, 博士研究生; 刘恩龙(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘恩龙(1976—), liuenlong@scu.edu.cn

大、未冻水含量高、强度低、流变性等特点。因而,针对高温高含冰量冻土的研究具有较高的复杂性。青藏高原多年冻土区是中国最主要的多年冻土分布区域,就其年平均地温而言大部分属于高温冻土的范围。而青藏公路穿越的多年冻土中年平均地温高于 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温冻土段占多年冻土长度的76%^[2]。在高温冻土区的活动层下部,由于重复分凝机制的作用^[3],极易产生高温高含冰量冻土。高温高含冰量冻土固有的特性使得其工程性质极差,导致了路面开裂、管道变形、房屋倾斜等工程病害,造成了工程运营安全隐患大、维护费用高等社会问题。因此,对于高温高含冰量冻土的研究具有极大的必要性。

早期,学者们主要通过单轴压缩试验来对高温高含冰量冻土展开研究。文献[4]研究了冻结青藏粘土在不同温度、不同含冰量下的单轴抗压强度,发现高温高含冰量粘土的应力-应变曲线为应变硬化型,且试样的破坏形式以塑性破坏为主。文献[5]对高温高含冰量冻土进行了一系列单轴压缩试验,分析了土壤类型、冰粒大小、温度、含水量和应变率对应力应变行为的影响。文献[6]通过单轴压缩试验研究了不同含冰量的高含冰量粉质砂土的破坏与屈服特性。后来,学者们通过其他手段对高温高含冰量冻土展开更加深入的研究。文献[7]通过对青藏高原砂土展开的三轴试验分析了不同温度下砂土强度随含水率的变化特征以及同一含水率下砂土强度对温度的依赖性,并给出了相应的冻土强度屈服准则。文献[8]基于冻结砂土的三轴试验,研究了围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度的影响特性。文献[9]研究了高温高含冰量粉质黏土在荷载作用下的动应力应变关系和动弹性模量,发现了动弹性模量随温度升高而减小,随含水量的增大先减小后增大。文献[10]对青藏铁路路基下高温高含冰量冻土开展了一系列旁压强度试验,发现引起路基下多年冻土温度升高,未冻水含量增加,最终导致冻土旁压临塑压力、旁压极限压力和旁压剪切模量均有下降。文献[11-12]对高温高含冰量冻土基础进行了现场承压试验,并结合融化固结理论通过数值方法来模拟野外承台的沉降过程。针对高温冻土的蠕变特性,大量学者对高温冻土在不同的温压条件下的破坏类型与蠕变类型也展开了很多研究^[13-15]。近年来,随着对高温冻土的深入认识,文献[16-17]研究了高温冻土变形过程中的孔压变化,证明了高温高含冰量冻土变形过程中存在固结作用。

但是,目前的试验研究大多致力于高温高含冰

量冻土强度、应力应变曲线的研究,缺失了体变规律这一重要力学特征。而体变对于冻土路基变形、房屋地基变形等工程问题具有很重要的意义。而且,已有的关于高温高含冰量冻土的研究多是对表观试验现象的描述,而对于其内在变形机制的解释和认识不足。基于此,本文以常规饱和冻结砂土和高含冰量冻结砂土为研究对象,通过开展 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的三轴试验,讨论分析了围压和含冰量对冻结砂土力学特性的影响,并根据试验结果深入分析了常规饱和和冻土与高含冰量冻土在变形机制上的差异。

1 试样制备及试验方法

1.1 高含冰量冻结砂土制样方法

本文中的高含冰量试样指的是含水率超过饱和含水率的冻土试样。在进行高含冰量冻土试验时,制样是本文首先碰到的难题。由于高含冰量冻土的含水率超过饱和含水率,导致其制样方法与常规冻土制样方法远远不同。而学者们针对不同土质也探索出了不同的制样方法。1981年,文献[18]首先将干土分层装入模具并击实,然后抽真空饱水,最后再在一个开放系统中从顶部向下冻结,从而成功制成了高含冰量冻土。但是这种方法不适用于砂土等易沉淀的材料。而且当试样含水率较高时,试样的均匀性难以保证。文献[19]先根据所需的含冰率分别计算好土、冰、水的质量,将冰破碎后与干土混合后装样,而后将剩余质量的水以液态水的形式直接倒入模具中。但该方法在补水过程中会将冰土混合物表面融化,并且试样内部易产生孔隙。文献[20]先根据所需的含冰率分别计算好土、冰、水的质量,将冰破碎后与干土混合,再倒入接近零度的水后搅拌均匀并压样。该方法可以较好地控制冻土试样的含冰量,但较难控制试样的饱和度,难以制出饱和和冻土试样。文献[21]先根据目标含水率将液态水与干土混合搅拌均匀,然后分层注入 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铁质模具中恒温。这种制样方法同样不适合砂土等易沉淀的材料,且制出的试样分层现象较明显。

因而,根据砂土具有粒径大、无黏聚力、易沉淀等特性,在现有的高含冰量冻土制样方法的基础上,针对砂土提出了改进的高含冰量冻结砂土制样方法,具体如下:1)筛分标准砂,保留 $>0.5\sim 1\text{ mm}$, $>1\sim 2\text{ mm}$, $>2\sim 3\text{ mm}$ 3种粒径,将3种粒径的砂土按照3:2:1的质量比混合均匀,并放在负温的冷库中冷冻。2)在冷库中冻结适量冰块,放入碎冰机中打碎,过 2 mm 筛,留取 2 mm 以下的冰颗粒。3)将配好的砂土与冰颗粒按照一定的质量比混合均匀。可以通过简易的电动搅拌机来实现,避免了人工搅

拌不充分的问题。平均分 3 次装入三瓣模中,每次装入都控制相同的落锤次数来击实土体以保证试样的均匀性。且前两次击实后需用小刀划开土体上表面使其处于松散状态,以防止试样出现分层现象。4)三瓣模下部装上自制的补水装置,连接上接近零

度的液态水即可进行自下而上的补水过程。当试样上部有液态水溢出时结束补水,用止水夹夹住补水管防止水分流出。将饱水后的试样放在冷库中冷冻 24 h 即可拆样。拆样时可用热吹风机吹三瓣模表面几秒钟,即可轻易拆样。制样过程如图 1 所示。



图 1 高含冰量砂土试样制样过程

Fig. 1 Ice-rich frozen sand specimens preparation process

该制样方法需控制第 3) 步中砂土与冰颗粒的质量比,保证砂土与冰颗粒充分搅拌混合均匀,即可制出不同含冰量的高含冰量砂土试样。该制作方法首先保证了砂土颗粒在试样中的均匀分布,其次自下而上的补水方式极大避免了试样中气泡的产生,另外防止了分层击实导致试样的分层现象。

最终,通过控制第 3) 步中砂土与冰颗粒的质量比,即土冰比,制出不同含冰量(含冰质量分数)试样见表 1。

表 1 不同土冰比对应的含冰质量分数

Tab. 1 Ice content corresponding to different sand-to-ice mass ratios

土冰比	1:0.2	1:0.4	1:0.6	1:0.8	1:1
含冰质量分数/%	41	67	97	127	167

本文中的含冰量为含冰质量分数,指的是试样冻结后冰的质量与砂土质量的比值。另外,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)中的真空抽气饱和法制备了常规的饱和冻结砂土试样,通过测量制样所需的砂土质量与最终试样的质量,得出常规饱和冻结砂土试样的含冰质量分数为 20%。

另外,为了验证试样内部是否完全饱和,在制样过程中,通过分别测量装入模具中砂土颗粒、冰颗粒

的质量以及饱水量,可以换算出试样最终的气泡孔隙率。通过测量 3 个 67% 含冰质量分数的砂土试样,得出 3 个试样的气泡孔隙率分别为 1.01%、2.46%、1.62%。因而试样内少量的气泡不可避免,但是气泡孔隙率均小于 5%,符合饱和试样的标准。

1.2 试验仪器及方法

为了探究不同含冰量高温冻结砂土力学性质的差异,通过低温 MTS-810 材料测试仪分别展开了 -1.5 °C 下不同围压与不同含冰量的三轴压缩试验,试验仪器如图 2 所示。该试验仪器主要由压力仓、轴压加载装置、围压加载装置、控温冷浴系统与数采控制系统 5 部分组成。其中控温冷浴系统温度控制在 -30 ~ 20 °C 之间,同时试验过程中的围压、轴压、加载速率、加载频率等均可由数采控制系统控制,并实时监测采集时间、围压、轴压、轴向位移、围位移与温度等参数。

三轴压缩试验首先需要控制压力仓温度到 -1.5 °C,然后放入试样恒温 12 h。待温度稳定后,开始加载围压。为防止试样蠕变性对试验结果的影响,统一设计为 5 min 内加载到目标围压,再恒定 5 min 后开始施加轴压。轴压的施加通过应变控制,加载速率为 1 mm/min。当试样丧失承载能力或者

应变达到 15% 时, 本文就认为试样破坏而终止试验。同时, 本试验对试样在加载过程中的体变也进行了监测, 主要通过围位移计算液压油进入压力罐的体积, 通过轴向位移计算轴向控制杆进入压力罐的体积, 两者之和即为试样的体缩量。

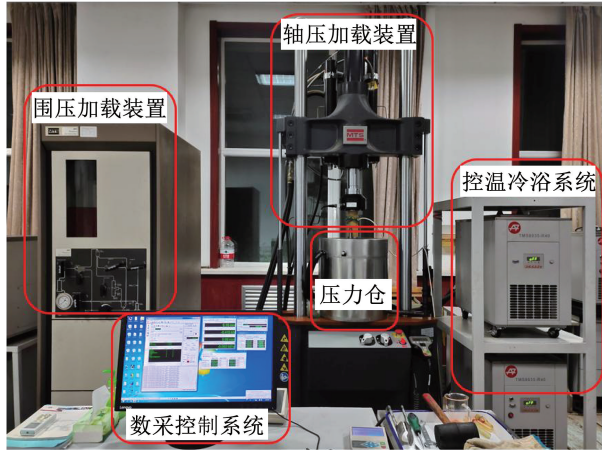


图2 低温 MTS-810 材料测试仪

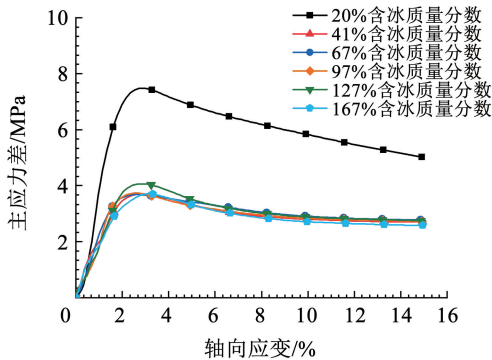
Fig. 2 MTS-810 material test device

2 试验结果与分析

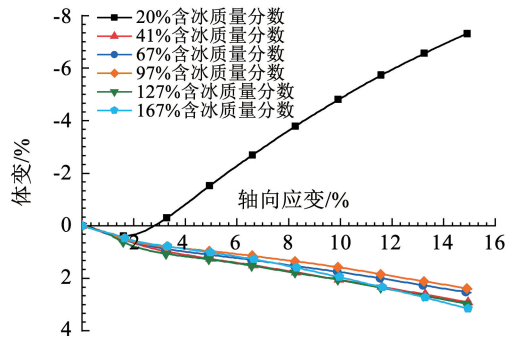
2.1 不同含冰量高温冻结砂土三轴压缩试验

为研究不同含冰量对高温冻结砂土力学性质的影响, 制备了 20%、41%、67%、97%、127%、167% 6 种含冰质量分数的冻结砂土试样, 其中 20% 含冰质量分数为常规饱和冻结砂土试样。然后在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下对不同含冰量的试样分别展开了 1 MPa 和 2 MPa 围压下的三轴压缩试验。试验结果如图 3、4 所示。

由图 3 和图 4 发现, 在 1 MPa 围压下, 20% 含冰质量分数的试样的强度为 7.47 MPa, 而 5 组高含冰量试样的强度均在 3.7 ~ 4.06 MPa 之间的小范围内波动。在 2 MPa 围压下, 20% 含冰质量分数的试样的强度为 8.67 MPa, 而 5 组高含冰量试样的强度均在 3.2 ~ 4.09 MPa 之间的小范围内波动。从而可以得出, 常规饱和冻结砂土和高含冰量冻结砂土的强度与体变规律差距极大, 而不同含冰量的高含冰量冻结砂土的主应力差-应变曲线和体变曲线却很接近。



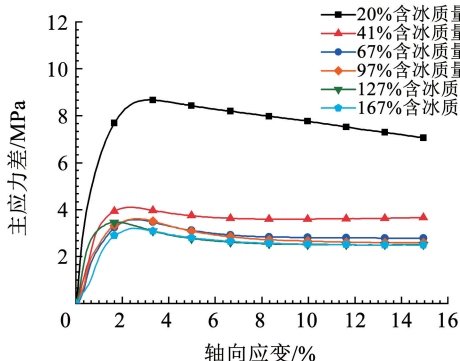
(a) 主应力差-轴向应变曲线



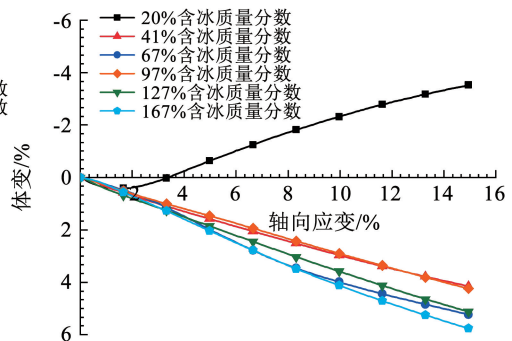
(b) 体变-轴向应变曲线

图3 不同含冰质量分数试样在 1 MPa 围压下的主应力差-轴向应变曲线和体变-轴向应变曲线

Fig. 3 The deviatoric stress-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve of specimens with different ice contents under 1 MPa confining pressure



(a) 主应力差-轴向应变曲线



(b) 体变-轴向应变曲线

图4 不同含冰质量分数试样在 2 MPa 围压下的主应力差-轴向应变曲线和体变-轴向应变曲线

Fig. 4 The deviatoric stress-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve of specimens with different ice contents under 2 MPa confining pressure

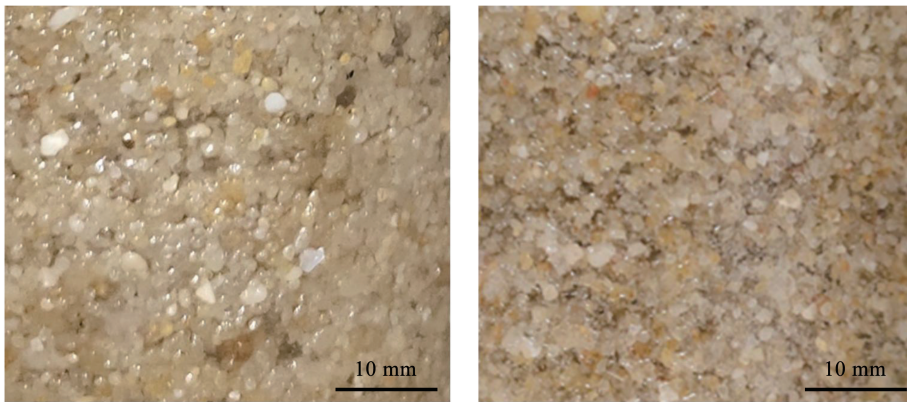
另外,在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,不同含冰量的试样在不同的围压下均呈现出应变软化的趋势。而且两种围压下,常规饱和和冻结砂土的体变均呈现出先体缩后体胀的趋势,而不同含冰量的高含冰量冻结砂土均表现出体缩的趋势。

分析认为,在高温冻土中,试样所受到的外力主要由骨架应力、冰压力和未冻水压力三者共同承受。由于 20% 含冰质量分数的试样是常规的饱和冻土试样,制样时砂土颗粒先紧密堆积于模具中,然后抽气饱和并冻结而成。常规饱和和冻结砂土中的土颗粒是相互接触且紧密堆叠的。在受力过程中,土颗粒骨架能够承受一部分外力,因而强度较高。另外,在 20% 含冰质量分数的试样中,刚开始加载时,由于试样内部微孔隙的闭合,会导致试样先发生体缩。随着围压的增大,土颗粒之间发生了滑移而产生了体胀,最终导致了试样在加载的过程先体缩后体胀的规律。

而 41% 含冰质量分数与更高含冰量的试样是经过土颗粒与冰颗粒混合后装入模具,然后饱水并冻结而成。此类试样由于较高的含冰量,使得土颗粒之间并不能充分的接触,因而土颗粒骨架所能承

受的外力被极大地削弱了。这时,土颗粒主要作为一种夹杂存在于冰和未冻水之间来间接影响试样的力学性质。根据图 3 和图 4 的试验结果来看,在 41% ~ 167% 这个含冰质量分数之间,夹杂物的数量对冰的力学性质影响并不大。另外,正是因为土颗粒之间不能相互接触产生滑移,而加载过程中又伴随着微孔隙的闭合与冰的压融,最终导致了高含冰量试样体变的总体趋势为体缩。

另外,在图 4 中发现,41% 含冰质量分数试样的强度略大于其他高含冰量冻结砂土的强度。为了防止试验误差导致的结果,试验中重复了多组 41% 含冰质量分数在 2 MPa 围压下的三轴试验,最终都得到了类似的规律。经过分析发现,相比其他高含冰量试样,41% 含冰质量分数试样是最接近饱和试样的。由于试样中土颗粒含量较高,因而不可避免地导致部分土颗粒之间相互接触。部分土颗粒的接触在试样中形成了局部的土骨架,而围压又强化了土骨架的作用,最终导致 41% 含冰质量分数试样在 2 MPa 围压下的强度高于其他组高含冰量试样。图 5 展示了常规饱和和冻结砂土试样和高含冰量冻结砂土试样的局部实拍。



(a) 常规饱和和冻结砂土 (b) 41%含冰质量分数冻结砂土

图 5 常规饱和和冻结砂土试样和高含冰质量分数冻结砂土试样的局部实拍

Fig. 5 Local pictures of conventional saturated frozen sand and ice-rich frozen sand

另外,围压对不同含冰量冻结砂土试样强度的影响如图 6 所示。可以发现围压对不同含冰量冻结砂土试样强度的影响是截然不同的。在较低含冰量时,增加围压可以强化试样,增大其强度;在中等含冰量时,围压对试样的强度影响不大;在较高含冰量时,增加围压会弱化试样,降低其强度。分析认为,当试样含冰量较低时,土颗粒作为骨架存在,围压的增大可以使骨架的连接更加紧密,因而会增大试样的强度。但使当含冰量较高时,土颗粒作为冰的夹杂,围压的增大会使冰的力学性质劣化,因而降低了试样的强度。

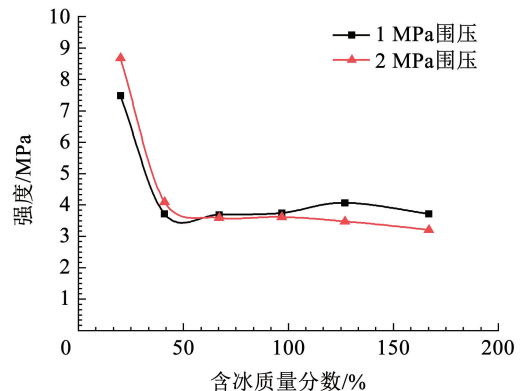


图 6 不同含冰质量分数冻结砂土试样的强度

Fig. 6 Strength of frozen sand with different ice contents

2.2 不同围压下高温冻结砂土三轴压缩试验

本试验首先在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下针对常规饱和冻结砂土进行 0.3 MPa 、 1 MPa 、 2 MPa 、 4 MPa 围压下的三轴试验。另外,由 2.1 节可知,在 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,不同含冰量的高含冰量冻结砂土力学性质很接

近。那么本试验就选择 67% 含冰质量分数的试样最为高含冰量冻结砂土试样的代表来进行不同围压下的三轴试验。两者的主应力差-轴向应变曲线和体变-轴向应变曲线如图 7、8 所示,强度曲线如图 9 所示。

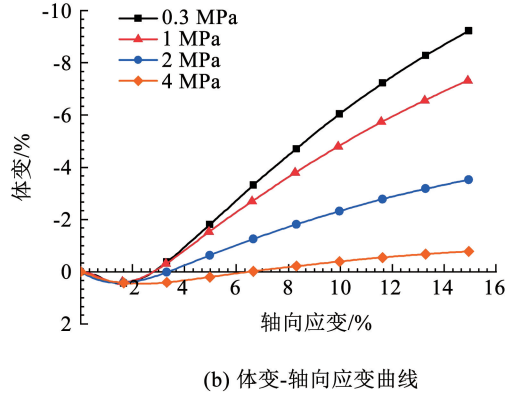
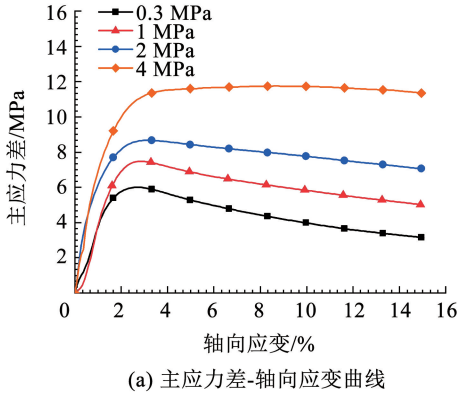


图 7 常规饱和冻结砂土试样在不同围压下的主应力差-轴向应变曲线和体变-轴向应变曲线

Fig. 7 The deviatoric stress-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve of conventional saturated frozen sand under different confining pressures

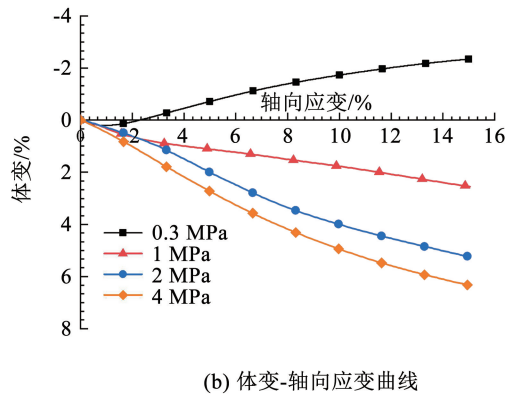
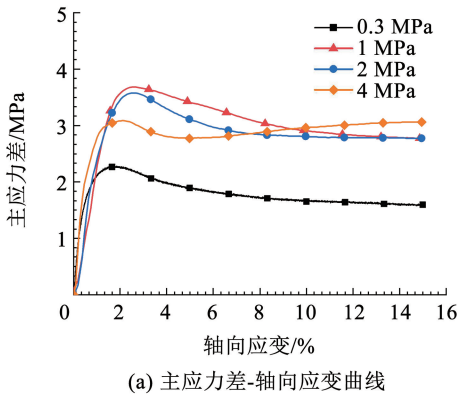


图 8 67% 含冰质量分数冻结砂土试样在不同围压下的主应力差-轴向应变曲线和体变-轴向应变曲线

Fig. 8 The deviatoric stress-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve of frozen sand with 67% ice content under different confining pressures

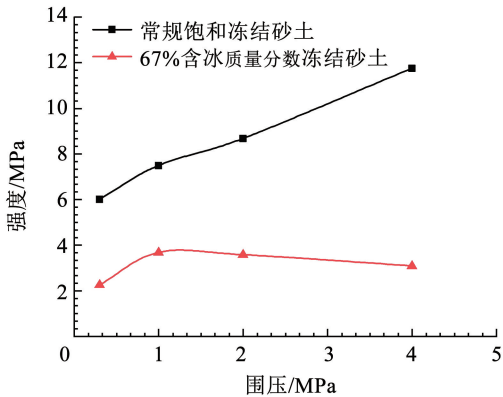


图 9 常规饱和冻结砂土和 67% 含冰质量分数冻结砂土试样在不同围压下的强度曲线

Fig. 9 Strength of conventional saturated frozen sand and 67% ice content frozen sand under different confining pressures

由主应力差-轴向应变曲线可知,两者的主应力差-轴向应变曲线总体呈现出应变软化的趋势,且随着围压的增大,应变软化的程度逐渐降低。但是,随着围压的增大,常规饱和冻结砂土试样的强度随着围压的增大基本呈线性增大,而 67% 含冰质量分数冻结砂土试样的强度呈现出先增大后缓慢线性降低的趋势。另外,从体变-轴向应变曲线可以看出,常规饱和冻结砂土试样在不同围压下均表现出了先体缩后体胀的趋势,且体胀量会随着围压的增大而降低。 67% 含冰质量分数冻结砂土试样在低围压下表现为先体缩后体胀,而在高围压下总体表现为体缩,且体缩量随着围压的增大而增大。

分析认为,由于常规饱和冻结砂土试样中的土颗粒相互接触,围压的作用强化了骨架的结构,因而

导致试样强度随着围压的增大而增大。在 67% 含冰质量分数冻结砂土试样中, 较低的围压能够强化的试样的结构。而在高围压作用下, 由于高含冰量使得试样的压融作用比较强烈, 而且土颗粒夹杂对冰的劣化作用也更加明显, 两者共同作用下使得试样的强度降低。另外, 由体变-轴向应变曲线可以看出, 随着围压的增大, 无论是常规饱和冻结砂土试样体胀量降低, 还是 67% 含冰质量分数冻结砂土试样体缩量增大, 围压对两种试样体变的影响趋势是相同的。而导致 67% 含冰质量分数冻结砂土试样在高围压下体缩的原因, 分析认为主要是高围压的压融作用以及试样内少量封闭孔隙的压缩导致的。

3 高温高含冰量冻结砂土变形机制分析

区别于常规的冻土, 高温高含冰量冻结砂土具有很多自己的特性。比如说温度敏感性高、未冻水含量高、压融作用明显、土颗粒无黏聚力且悬浮于冰中等。正是这些特性导致了其区别于常规冻土的力学性质。

对于高温高含冰量冻结砂土而言, 其结构主要

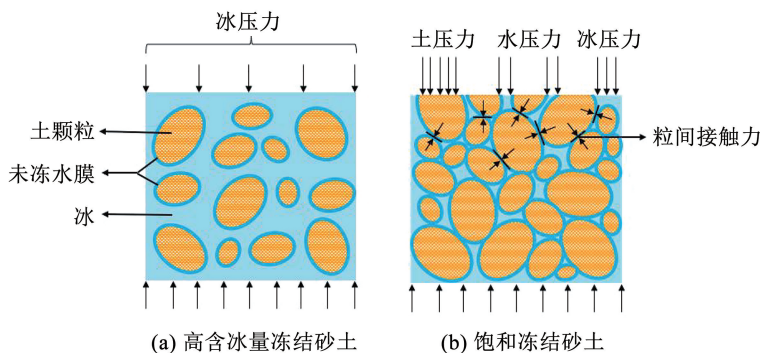


图 10 高含冰量冻结砂土与饱和冻结砂土受力机制示意

Fig. 10 Illustration of the force mechanism of ice-rich frozen sand and conventional saturated frozen sand

以往对冻土的研究往往将冻土看成一种整体的、静态的材料。而真实的高温高含冰量冻结砂土实质上是一个由土颗粒、冰和未冻水组合而成的复合材料。且其特性决定了其中的冰和未冻水在外部温度或力的扰动下极易发生相互转化。因而, 只有将高温高含冰量冻结砂土视为一种复合材料, 研究土颗粒、冰和未冻水之间的相互作用, 并将冰和未冻水之间的物质能量运输考虑进来, 方能真正揭示高温高含冰量冻结砂土的变形机制。

4 结 论

基于常规饱和冻结砂土和高含冰量冻结砂土的三轴试验, 研究了不同含冰量、不同围压下高温冻结砂土的力学特性, 揭示了常规饱和冻结砂土和高含

由悬浮着土颗粒的冰构成。土颗粒之间无黏聚力且相互不接触。因此认为试样受力过程中主要由冰直接承担外力。但是土颗粒作为冰中的夹杂对冰的性质有很大的影响, 但具体的影响方式有待研究。当围压较低时, 外力强化了土颗粒与冰之间的胶结作用; 而当围压较高时, 外力破坏了土颗粒与冰之间的胶结作用, 加剧了冰的压融, 最终导致高温高含冰量冻结砂土的强度随围压的增大而先增大后降低。

而当常规饱和冻结砂土试样受力时, 本文认为是土颗粒、冰和未冻水共同承担了外力的作用。由于土颗粒之间是相互接触的, 从而构成了土颗粒骨架, 而外载的增大能够在一定范围内强化骨架的连接。而对于冰和未冻水来说, 外载在一定程度上对冰进行了强化或劣化作用, 且外载的增大加速了冰向未冻水的转化, 从而降低了冰的承载力。当骨架的强化作用大于冰的劣化作用时, 就能够解释常规饱和冻结砂土试样的强度随着围压的增大而增大的现象了。如图 10 为高温高含冰量冻结砂土与饱和冻结砂土受力机制示意。

冰量冻结砂土不同的变形机制, 结论如下:

1) 在前人制作高含冰量冻土经验的基础上, 针对砂土等在水中易沉淀的土质提出了“冰砂混合, 分层压实, 下部补水”的制样方法, 成功地制出了土颗粒分布均匀的高含冰量饱和冻结砂土试样。

2) 高含冰量冻结砂土与饱和冻结砂土的力学性质差异很大, 与饱和冻结砂土的强度和体变相比, 高含冰量冻结砂土的强度降低很多, 且体积变形均表现为体缩。但是, 不同含冰量的高含冰量冻结砂土的应力应变关系和体变很接近。

3) 不同围压下的 67% 含冰质量分数冻结砂土均为应变软化型; 且随着围压的增大, 应变软化的程度逐渐降低, 体变逐渐由体胀向体缩转化。

4) 以颗粒接触的角度, 分析了高温高含冰量冻

结砂土的变形机制,认为饱和冻结砂土受力是由土颗粒、冰和未冻水共同承担;而高温高含冰量冻结砂土主要由冰直接承担外力,冰中夹杂的土颗粒间接影响了冰的力学性质。

参考文献

- [1] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985
TSYTOVICH N A. The mechanics of frozen ground[M]. Beijing: Science Press, 1985
- [2] 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
CHENG Guodong. Research on engineering geology of the roadbed in permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 134
- [3] CHENG Guodong. The mechanism of repeated-segregation for the formation of thick layered ground ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 1983, 8(1): 57
- [4] 马小杰. 高温-高含冰量冻土强度及蠕变特性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006
MA Xiaojie. Study on strength and creep characteristics of warm and ice-rich frozen soil [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [5] ZHANG Shujuan, SUN Zhizhong, DU Haimin. A preliminary analysis of main factors affecting stress-strain behaviors of frozen soil with high water content[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204-208: 128
- [6] DU Haimin, MA Wei, ZHANG Shujuan, et al. Strength properties of ice-rich frozen silty sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture contents[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123: 107
- [7] 赖远明, 张耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3665
LAI Yuanming, ZHANG Yao, ZHANG Shujuan, et al. Study on warm and ice-rich permafrost beneath Qinghai-Tibet Railway embankment with pressiometer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3665
- [8] 杜海民, 马巍, 张淑娟, 等. 围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度影响特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1943
DU Haimin, MA Wei, ZHANG Shujuan, et al. Effects of confining pressure and water content on failure strain energy density for frozen silty sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1943
- [9] 许俊豪, 陈页开, 霍晓辉, 等. 地震荷载下高含冰量冻土的动力特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 25
XU Junhao, CHEN Yekai, HUO Xiaohui, et al. Experimental study on dynamic characteristics of ice-rich frozen soil under earthquake load[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 25
- [10] 马小杰, 张建明, 郑波, 等. 青藏铁路路基下高温-高含冰量冻土旁压试验研究[J]. 岩土力学, 2008(3): 764
MA Xiaojie, ZHANG Jianming, ZHENG Bo, et al. Study on warm and ice-rich permafrost beneath Qinghai-Tibet Railway embankment with pressiometer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3): 764
- [11] 刘世伟, 张建明, 张虎, 等. 青藏高原多年冻土长期蠕变变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3245
LIU Shiwei, ZHANG Jianming, ZHANG Hu, et al. Research on long-term creep test of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup. 1): 3245
- [12] LIU Shiwei, ZHANG Jianming, ZHENG Bo, et al. Compression test and pore-water pressure measurement for warm and ice-rich frozen soil[C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost. Salekhard: The Northern Publisher, 2012
- [13] YANG Yugui, LAI Yuanming, CHANG Xiaoxiao. Experimental and theoretical studies on the creep behavior of warm ice-rich frozen sand[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63(1): 61
- [14] HOU Feng, LAI Yuanming, LIU Enlong, et al. A creep constitutive model for frozen soils with different contents of coarse grains[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 119
- [15] LIAO Mengke, LAI Yuanming, LIU Enlong, et al. A fractional order creep constitutive model of warm frozen silt [J]. Acta Geotechnica, 2016, 12(2): 1
- [16] ZHANG Hu, ZHANG Jianming, ZHANG Zhilong, et al. Investigation of the pore-water pressure of saturated warm frozen soils under a constant load[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2016, 138(6): 062001
- [17] ZHANG Hu, ZHANG Jianming, ZHANG Ze, et al. Variation behavior of pore-water pressure in warm frozen soil under load and its relation to deformation[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(3): 603
- [18] SAYLES F H, CARBEE D L. Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight[J]. Engineering Geology, 1981, 18(1/2/3/4): 55
- [19] NICKLING W G, BENNETT L. The shear-strength characteristics of frozen coarse granular debris[J]. Journal of Glaciology, 1984, 30(106): 348
- [20] 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
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
- [21] 杜海民. 高含冰量冻结砂土的破坏与屈服特性试验研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2016
DU Haimin. Laboratory investigation on failure and yield properties of ice-rich frozen silty sands[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2016