

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201702062

冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验

胡田飞^{1,2}, 刘建坤^{1,2}, 房建宏², 徐安花², 常 丹^{1,2}

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2.青海省交通科学研究院 多年冻土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地, 西宁 810000)

摘 要: 为研究初始含水率对土体力学性质冻融循环效应的影响规律,以青藏高原粉质黏土为对象,进行不同含水率、围压及冻融次数条件下的三轴试验,结果表明:冻融循环使得不同初始含水率试样的应力-应变曲线趋于接近,低含水率试样的力学性质表现为劣化,在一定范围内,含水率越高,劣化效果越显著;当含水率增加至某一值后,一般为接近塑限时,冻融循环效应则表现为强化;封闭条件下土体冻融循环中的水分迁移会引起含水率的增减分区分布,且初始含水率越高,水分迁移量越大;土体破坏强度随含水率的增加以非线性规律减小,因此试样冻融循环后含水率增大区和减小区的强度变化幅度不同,会引起破坏强度增大、减小及不变等3种不同的变化趋势;冻融循环下土体力学性质会受到干密度、水分重分布及土体结构改变等多方面的影响,初始含水率和冻融次数不同,占主导地位的因素也不同,冻融循环效应就相应地呈现出多样化特征。

关键词: 冻融循环;含水率;粉质黏土;破坏强度;非线性;抗剪强度指标

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)12-0123-08

Experimental study on the effect of moisture content on mechanical properties of silty clay subjected to freeze-thaw cycling

HU Tianfei^{1,2}, LIU Jiankun^{1,2}, FANG Jianhong², XU Anhua², CHANG Dan^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Transportation Industry Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Permafrost Regions-Qinghai Research Observation Base, Qinghai Research Institute of Transportation, Xining 810000, China)

Abstract: To study the effect of moisture content on mechanical properties of soil subjected to freeze-thaw cycling, a series of triaxial tests were conducted under different confining pressures for samples which were made of silty clay from Qinghai-Tibet Plateau with different original moisture contents and had experienced various freeze-thaw cycles. The results show that the stress-strain curves of samples with different moisture contents tend to be similar after freeze-thaw cycling. The freeze-thaw cycling effect is uncertain because of the level of original moisture content. It is deteriorating for soil with low moisture content, and the deteriorating degree aggravates with the increase of moisture content within a certain range. When the moisture content is increased to a certain value which is generally close to the plastic limit, the effect is strengthening conversely. The water migration inside samples, which are subjected to freeze-thaw cycling in a closed system, leads to the redistribution of moisture content. The higher the original moisture content is, the larger the water migration amount is. The failure strength of soil decreases with the increase of moisture content in a nonlinear law, so the change amplitude of strength in the increase zone of moisture content is different with that of the decrease zone. The failure strength of sample may exhibit different tendencies including increase, decrease or remain unchanged. The mechanical properties of soil subjected to freeze-thaw cycling are affected by the dry density, moisture redistribution and soil structure simultaneously, but the dominant factor is changeable due to different moisture contents and number of freeze-thaw cycles, which makes the freeze-thaw cycling effect on soil diversified correspondingly.

Keywords: Freeze-thaw cycling; moisture content; silty clay; failure strength; nonlinear law; shear strength index

土体的冻融循环实质上是土中水受环境温度正负交替的影响在固、液两相间相互转化的过程,一方

面引起土体的附加变形,另一方面会引起土体物理力学性质的改变,是各类冻土工程出现病害的主要原因之一^[1].对于土体物理和力学性质的冻融循环效应,前者主要对干密度、含水率、渗透性及颗粒级配等常规指标进行研究;后者主要以抗压强度、黏聚力、内摩擦角、动强度等指标为研究对象,并以一些物理指标及改良剂为变量分析其在不同条件下的变

收稿日期: 2017-02-24

基金项目: 交通运输部应用基础研究计划(重点平台)项目(2014319363200);国家自然科学基金(51378057, 41371081)

作者简介: 胡田飞(1988—),男,博士研究生;

刘建坤(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 刘建坤, jkliu@bjtu.edu.cn

化规律及内在机理^[2-4].

其中,在冻土工程建设和工后运营中,受工程行为、自然风干、地下水、大气降雨、融雪等因素的影响,土体含水率经常偏离初始设计值而呈现动态变化特征,是冻融循环中最为常见的一个变量.土体的冻融循环效应是由水分的迁移和相变引起的,因此初始含水率对冻融循环效应的影响是一个值得关注的问题,目前已有一些相关的研究.王铁行等^[5]通过直剪试验发现当非饱和黄土含水率较低时,冻融循环对黏聚力基本没有影响,当含水率较高时,黏聚力较冻融前降低,且冻融次数越多,降低值越大;不同含水率试样的内摩擦角经冻融后均增大,且含水率越高,增加值越大.毛雪松等^[6]认为土体的回弹模量随冻融次数的增加大体上呈衰减趋势,且回弹模量的衰减幅度随着含水率的减小而减小,而增湿过程中其强度衰减幅度基本保持不变.张辉等^[7]对不同初始含水率黄土进行直剪试验,结果表明黏聚力随冻融次数的增加呈指数形式减小,含水率越高,黏聚力减小幅度越大,内摩擦角则略微增大.然而,也有一些研究的结论与上述规律不同.董晓宏等^[8]通过重塑黄土的冻融试验和直剪试验发现在一定范围内含水率越低,冻融循环的劣化作用越明显.胡再强等^[9]对不同初始含水率黄土进行静三轴试验,结果表明黏聚力随冻融循环的降低幅度随着含水率的增大而减小,当含水率很高时,黏聚力下降不明显;内摩擦角则呈无规律的波浪型变化,总体有略微变小的趋势.此外,Oztas 等^[10]观察到冻融循环会引起地表高含水率土体的力学性质强化现象.Viklander^[11]和 Qi 等^[12]则发现低压实度土体的黏聚力和前期固结压力在冻融循环之后有所增大.上述研究说明在不同的土性和试验条件下,冻融循环后压实土的力学性质可能出现劣化和强化两种相反的效应,且出现这一差异化的原因及两者随含水率的变化规律尚无一致结论.

尤其对于冻融循环强化现象,明确其内在机理和产生条件具有重要的工程意义.董晓宏等^[8]认为水分的析出和散失会引起强化现象,但封闭条件下的水分散失属于偶然因素.Zhang 等^[13]从微观结构角度认为冻融循环使得土体内部团粒破碎和接触点增多,进而引起摩擦强度的提高.Qi 等^[12]和宋春霞等^[14]认为冻结过程中负孔隙水压力对土体的超固结效应也会引起强化现象.限于量测手段,上述解释仍存在难以量化的不足,难以服务于工程实践.在非饱和土力学中,含水率和干密度对土体强度的影响最为显著,且强度与两者之间一般不是简单的线性关系^[15-17].那么,即使冻融循环后土体的干密度和水分总质量保持不变,水分迁移引起的含水率不均

匀分布也会导致破坏强度的改变,但这一因素尚未被采用于冻融循环效应的机理分析中.

针对这一问题,本文以初始含水率和冻融循环次数为主要变量对青藏高原粉质黏土进行三轴试验研究,进一步明确不同含水率土体力学性质随冻融次数的变化过程及规律.结合冻融循环下试样的水分重分布和体积变化特征,探讨水分重分布和破坏强度及抗剪强度指标之间的关系,及其与干密度对土体冻融循环效应的耦合作用机制.

1 试验试样与方案

1.1 试验材料

试验用土为取自交通运输部多年冻土研究观测基地表层的粉质黏土,其颗粒分布曲线和基本物理性质分别如图 1 和表 1 所示.

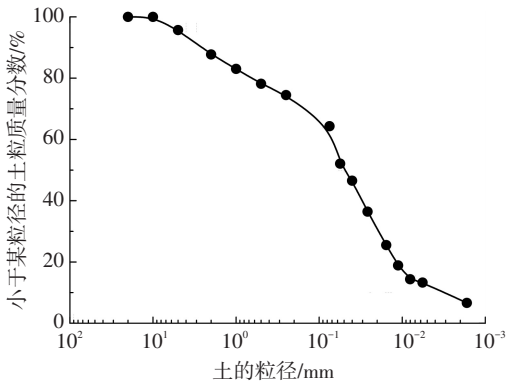


图 1 土体颗粒分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve

表 1 土体基本物性指标

Tab.1 Physical property indices of silty clay

液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最大干密度/ (g · cm ⁻³)	最优含 水率/%	相对 密度
28.0	17.7	10.3	1.828	14.8	2.64

1.2 试样制备

根据相关规范中填方路基的设计要求,本次试验的制样标准为在压实度 95% 条件下,配制含水率分别为最优含水率 w_{op} 和 $w_{op} \pm 2\%$ 的 3 种试样.首先,将土料翻晒烘干后过 2 mm 筛,按照设计含水率加水拌合均匀.然后,采用分层击实法,制备直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱体试样,干密度控制为 $1.737 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.试样制成后用塑料薄膜包裹密封,模拟无外界水源补给的封闭系统.

1.3 试验方案

为明确初始含水率对粉质黏土力学性质冻融循环效应的影响,选择含水率和冻融次数为试验变量,进行两个因素的全面试验.3 种含水率试样的冻融次数均设计为 0、1、3、6、9、12、15 次.冻融循环试验为封闭条件下的三向冻结和融化试验,首先进行冻

结试验,试验箱环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后进行融化试验,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.根据试验监测结果,冻结和融化时间均设置为 12 h ,以保证试样完全冻结和充分融化,此过程即为一次冻融循环.之后循环往复,达到设计冻融次数后取出所需试样进行试验,其余继续进行冻融循环.为辅助说明试样水分重分布对力学性质的影响,另外进行压实度 95% 、含水率为 $w_{\text{op}}\pm 1\%$ 和 $w_{\text{op}}\pm 3\%$ 的三轴试验.

冻融循环多发生在地基和路基的表层,由于压实过程的超固结应力历史和行车荷载的瞬时性,低渗透性的粉质黏土路基在融化阶段一般来不及发生排水固结过程,因此三轴试验类型选择为不固结、不排水(UU)试验.试验仪器选用南京土壤仪器厂的TSZ-1型三轴仪,围压分别取 50 、 100 、 150 kPa ,轴向加载速率为 0.4 mm/min ,控制应变为 20% .三轴试验方案见表1,共计75个试样.

表 2 三轴试验方案		
Tab.2 Scheme of triaxial test		
试验变量	主体试验	辅助试验
压实度/%	95	95
围压/kPa	50, 100, 150	50, 100, 150
含水率/%	12.8, 14.8, 16.8	11.8, 13.8, 15.8, 17.8
冻融循环次数	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15	0

此外,为确定初始含水率对土体冻融循环下水分迁移量的影响,测定3种试样在径向上的含水率分布特征随上述6种冻融次数的变化规律,冻融循环试验条件保持不变,共计18个试样.具体方法为将圆柱体试样沿径向五等分环切,采用烘干法测定各个位置土体的含水率.同时,采用蜡封法测定3种试样经历一次冻融循环后的体积变化量,各进行3组试验,结果取平均值,共计9个试样.

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

不同含水率、围压及冻融次数下试样的应力-应变曲线见图2.由图2(a)可见,相同轴向应变对应的偏应力随含水率的减小或围压的升高而增大.含水率 12.8% 试样的应力-应变曲线形式呈应变软化型,破坏时出现明显的破裂面,随着含水率的增加,应力-应变关系向硬化型转变.同时,硬化程度随围压的升高而增大,破坏形式由脆性向塑性过渡.由图2(b)可见,冻融循环6次时,不同试样的应力-应变曲线形式均未发生改变,含水率 12.8% 和 14.8% 试样的峰值强度有所减小,含水率越大,冻融循环影响越大;而含水率 16.8% 试样各轴向应变对应的偏应力值则明显增大,不同试样的应力-应变曲线趋于接近.由图2(c)可进一步发现,含水率 16.8% 试样

表现出与通常冻融循环劣化结果相反的效应,随着冻融次数的增加,试样经历冻融循环后的应力-应变曲线位置明显高于冻融之前,极限强度和残余强度均有所增大,应变软化程度降低.

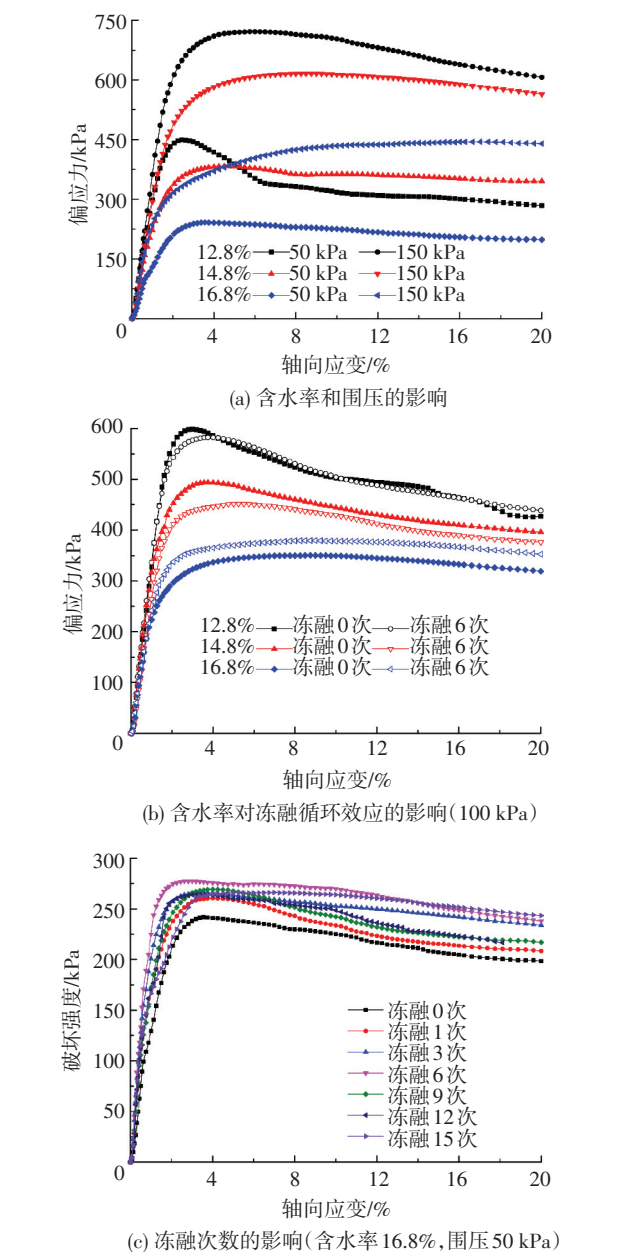


图 2 试样应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of samples

2.2 水分迁移特征

试样冻融循环前后的质量经测量保持不变,说明无水分的补给和散失.切割冻结试样可以发现表层的含冰量高于内部,冻胀也相对显著.由于土体温度梯度大小与热传导距离成反比,且圆柱体试样的侧面积比底面积大,三向冻融环境下试样径向的含水率不均匀分布程度相比轴向要高^[18].因此,本文侧重于分析试样径向的水分重分布特征.

图3为试样冻融循环后含水率沿径向的重分布特征.由图3(a)可见,经历一次冻融循环后,3种试

样的水分重分布趋势一致,均表现为表层含水率高于内部,形成增减分区分布现象,说明融化过程的水分回迁量小于冻结过程的正向迁移量.这是因为,土体的水分迁移与土水势梯度和温度梯度有关,并受到土性、边界条件、冻结速度等因素的影响.在冻结过程中,试样表层水分首先冻结并破坏原有的平衡状态,引起内部水分向冻结锋面迁移,导致体积膨胀和干密度降低.对于同一种土,含水率相同时,土水势随干密度的降低而减小^[19].而在融化过程中,试样内部温度会相对快地达到一致,因此干密度分布的改变和温度梯度的消失使得水分迁移强度相对较低.此外,初始含水率越大,试样表层含水率增加值越大,即水分迁移量越大.土体水分迁移量与冻结锋面在该位置的停留时间和温度梯度有关,这说明在温度梯度一定的条件下,含水率越大,冻结锋面的前进速度越小.

由图 3(b)可见,在初始的 6 次冻融循环内,水分迁移量在持续地累积增加,这主要是由于表层含水率增大区使得冻结锋面移动速度减小引起的.之后,土体结构和水分迁移路径进入一个新的稳定状态,水分正向和逆向的迁移量趋于相等,试样各位置的含水率即开始保持基本不变.

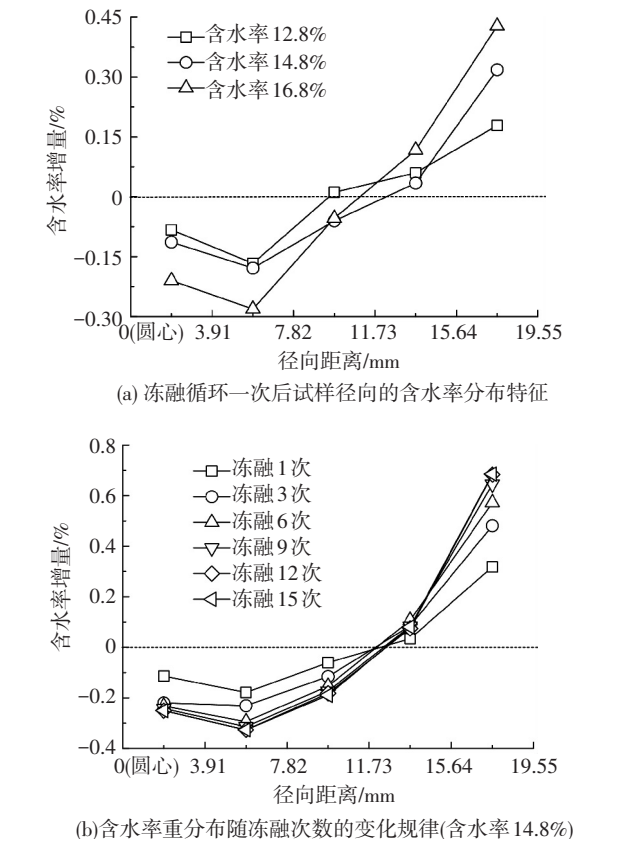


图 3 试样冻融循环后的水分重分布特征

Fig.3 Moisture redistribution characteristics of samples after freeze-thaw cycling

2.3 破坏强度

当应力-应变曲线形式为应变软化型时,取偏

应力峰值为破坏强度;为应变硬化型时,则取轴向应变 15%对应的偏应力值.不同试验条件下试样的破坏强度如表 3 所示,可以看出不同试样对冻融循环的响应特征有所区别.含水率 12.8%和 14.8%试样破坏强度在冻融循环后均减小,且后者相对显著,而含水率 16.8%试样破坏强度整体上表现为增大.图 4 为冻融循环一次前后试样破坏强度随含水率的变化规律,围压 50 kPa 时,含水率 12.8%和 14.8%试样破坏强度的减小率分别为 1.9%和 6.0%,说明在这一范围内含水率的增大会加剧劣化效应;含水率 16.8%试样破坏强度则比未冻融时增大 8.0%.

表 3 冻融循环下试样破坏强度的试验结果

Tab.3 Failure strength of samples after freeze-thaw cycling

		kPa							
含水率/%	围压	0 次	1 次	3 次	6 次	9 次	12 次	15 次	
12.8	50	449.3	440.8	433.4	430.2	430.3	429.2	431.5	
	100	598.8	588.8	585.4	582.7	582.4	577.4	581.6	
	150	721.4	710.4	702.7	700.9	699.3	699.8	701.2	
14.8	50	382.9	360.0	348.4	338.0	332.9	333.3	334.2	
	100	493.9	472.0	462.0	451.9	452.8	453.4	449.0	
	150	615.9	587.4	572.0	558.2	553.4	556.6	556.4	
16.8	50	241.4	260.7	266.3	277.4	269.5	264.1	266.2	
	100	350.5	365.4	372.5	379.4	375.8	374.1	374.9	
	150	442.4	471.1	483.0	495.0	485.5	480.9	483.6	

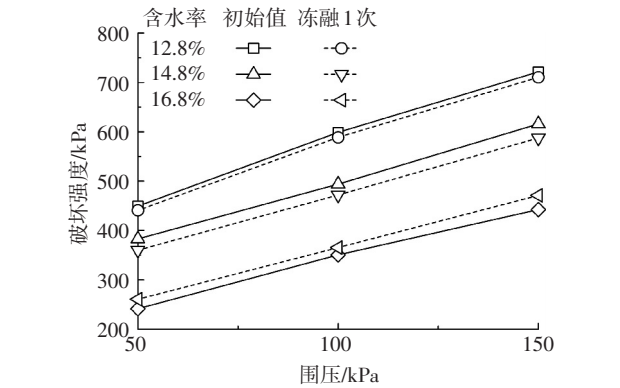


图 4 含水率对试样破坏强度冻融循环效应的影响

Fig.4 Influence of moisture content on freeze-thaw cycling effect on failure strength

图 5 为围压 50 kPa 条件下不同含水率试样破坏强度变化率随冻融次数的变化规律.可以看出,含水率 12.8%和 14.8%试样破坏强度随着冻融次数的增加呈先减小、后趋于稳定的规律,最终值相比初始值分别减小 4.0%和 12.7%.这是因为,经过多次冻融循环后,试样的土体结构和水分迁移会逐渐达到新的稳定状态,破坏强度也由此趋于稳定.同时,含水率 12.8%试样破坏强度在冻融 6 次之后基本保持稳定,含水率 14.8%试样则约需要 9 次,说明含水率越高,冻融循环效应的持续过程越长.不同的是,含水率 16.8%试样的破坏强度在 1~6 次冻融循环时出现逐渐增大的现象,之后逐渐减小并趋于稳定,最

终值相比初始值增大 10.3%.

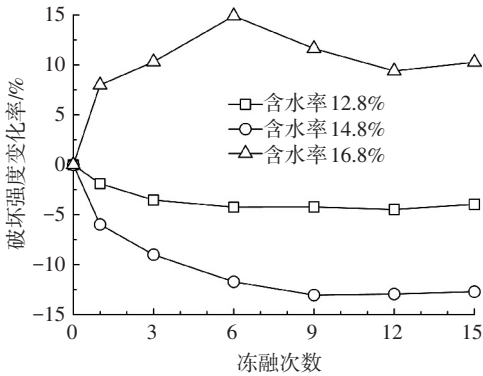


图 5 冻融次数对试样破坏强度的影响 (围压 50 kPa)
Fig.5 Influence of number of freeze-thaw cycles on failure strength of samples (confining pressure of 50 kPa)

图 6 为试样冻融循环一次后的体积变化量和平均干密度随含水率的变化规律.可以看出,试样体积在冻融循环后均有所增大,且变形量随含水率的增加而增大.相应地,含水率越高,土体微观结构和干密度的变化幅度越大,引起的力学性质劣化程度也越强烈.因此,可以排除文献[12-14]中所述土体微观结构或宏观干密度对文中含水率 16.8% 试样破坏强度增大现象的影响.这也说明,本文出现的冻融循环强化现象和土体含水率与冻胀率正相关的一般规律是相悖的,因此这一现象产生的原因是值得探讨的.

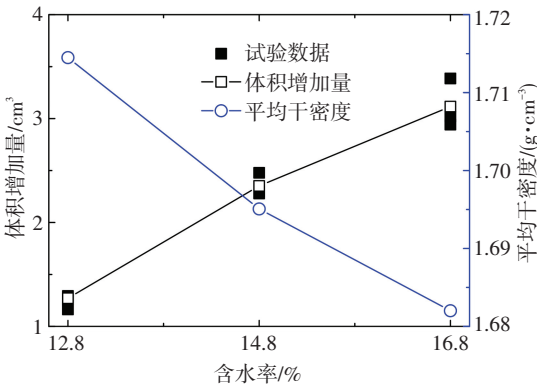


图 6 试样冻融循环一次后的体积和干密度变化量
Fig.6 Variation amount of volume and dry density of samples after one freeze-thaw cycle

2.4 冻融循环效应的机理分析

三轴试验中,加载过程沿着圆柱体试样的轴向进行,而三向冻融条件下试样的水分和干密度重分布主要发生在径向上,因此忽略轴向不均匀性的影响,认为试样破坏强度是径向不同位置土体强度的综合体现.由于非饱和土强度与含水率一般不是简单的线性关系,那么即使冻融循环后试样的水分总质量和干密度保持不变,径向含水率的增减分区域分布也会引起破坏强度的改变.

图 7 为不同围压下试样破坏强度随含水率的变化规律.令含水率 12.8%、14.8% 和 16.8% 试样与含

水率 $\pm 1\%$ 试样破坏强度的变化斜率分别为 k 、 l 和 m ,对于下标,围压 50、100 和 150 kPa 时分别标记为 A、B、C.以含水率 12.8% 试样为例,在围压 50 kPa 时,其与含水率 11.8% 和 13.8% 试样破坏强度值连线的斜率分别记为 k_{A-1} 和 k_{A-2} ,其余类同.由图 7(a)、7(b) 可见, $k_1 < k_2$, $l_1 < l_2$, 即在 11.8% ~ 15.8% 范围内,当含水率增大时,破坏强度的降低幅度呈增大趋势.这是因为,颗粒表面水膜随含水率的增大而变厚,颗粒之间的连接变弱,且这种效应随含水率的增大而加剧.由图 7(c) 可见, $m_1 > m_2$, 即在 15.8% ~ 17.8% 范围内,当含水率增大时,破坏强度的降低幅度却呈减小趋势.这是因为,含水率的持续增大使得土体中逐渐形成“自由水膜”,尤其当接近塑限时,含水率继续增大对土粒间阻力的改变很小.

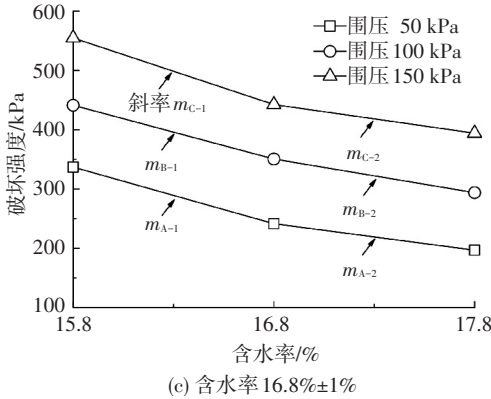
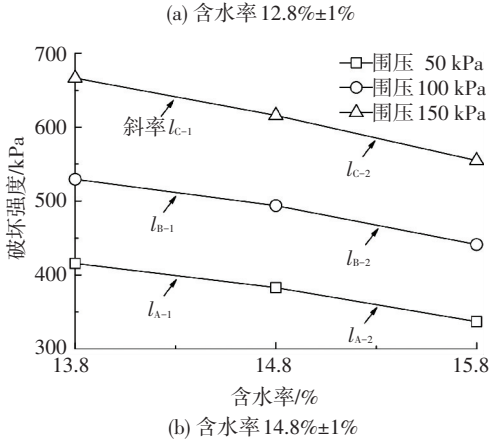
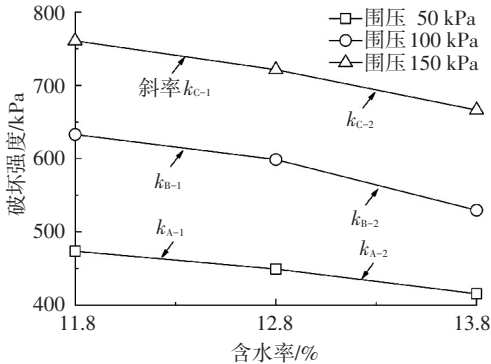


图 7 试样破坏强度随含水率的变化规律
Fig.7 Relationship between failure strength of samples versus moisture contents

根据图 7 所示试验结果可知,含水率 12.8%、14.8%和 16.8%试样含水率减小区和增大区的强度变化幅度是不同的.对于含水率 12.8%和 14.8%试样,含水率减小区的强度变化幅度相比增大区的要小,由此水分重分布会引起试样破坏强度的减小.但是,对于含水率 16.8%试样,含水率减小区的强度变化幅度相比增大区要大,会引起破坏强度的增大.如果含水率减小区和增大区强度变化幅度一致,则对试样破坏强度无影响.同时,3 种试样冻融循环后的干密度均有所减小,因此水分重分布是含水率 16.8%试样出现冻融循环强化现象的主要原因.

以往的研究结果一般认为,在封闭条件的冻融循环作用下,干密度变化是解释土体力学性质冻融循环效应最为直观的定量指标,且这一因素通常不利于强度的保持^[20].结合本文试验结果,可以认为干密度和水分重分布是影响土体冻融循环效应的两个主要因素,且两者影响是同时存在的.对于压实土,土体孔隙在水分冻结时增大,而在融化时一般无法完全恢复,从而引起干密度和破坏强度的减小.但是,水分重分布受初始含水率的影响则具有不确定性,根据含水率减小区和增大区强度变化幅度的不同,可能引起破坏强度增大、减小和不变 3 种不同的效果.当干密度和水分重分布均起劣化作用时,破坏强度表现为逐渐减小;当两者效果相反时,占主导地位的因素不同,就会出现不同的变化趋势.对于含水率 16.8%试样,在冻融初始阶段,水分重分布的强化作用占主导地位,因此破坏强度首先表现为逐渐增大;当水分迁移相对稳定后,冻融循环仍会引起干密度的减小,此时劣化作用开始占主导地位,破坏强度转而逐渐减小.

3 抗剪强度指标的冻融循环效应

抗剪强度指标值按应力路径法求取,以 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为纵坐标、 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为横坐标绘制应力圆,作通过各圆顶点的平均直线.根据直线倾角及其纵轴截距分别计算总内摩擦角和总黏聚力:

$$\varphi_u = \sin^{-1}(\tan \alpha), \tag{1}$$

$$c_u = d/\cos \varphi_u. \tag{2}$$

式中: α 为直线倾角, d 为直线的纵轴截距.

3.1 黏聚力

冻融循环下 3 种含水率试样黏聚力的试验结果见表 4.图 8 为黏聚力增量随冻融次数的变化规律.可以看出,含水率 12.8%和 14.8%试样黏聚力随冻融次数的增加呈先减小,后趋于稳定的规律,两者的最终减小率分别为 4.8%和 13.8%,说明含水率越高,黏聚力的减小幅度越大.含水率 16.8%试样黏聚力在冻融循环 1~6 次时逐渐增大,6~12 次时逐渐

减小,最终达到相对稳定状态,相比初始值,峰值和最终值分别增大 12.7%和 6.6%.

表 4 冻融循环下试样黏聚力的试验结果
Tab.4 Cohesion of samples after freeze-thaw cycling kPa

含水率/%	0 次	1 次	3 次	6 次	9 次	12 次	15 次
12.8	82.17	80.55	78.92	77.75	78.06	77.41	78.22
14.8	72.46	67.92	65.93	64.01	62.97	62.34	62.47
16.8	41.35	44.08	44.17	46.61	45.26	43.89	44.20

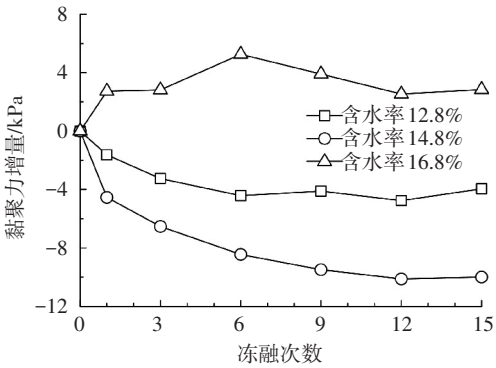


图 8 试样黏聚力增量随冻融次数的变化规律
Fig. 8 Relationship between cohesion increment of samples versus number of freeze-thaw cycles

根据图 7 计算抗剪强度指标随含水率的变化规律,结果见图 9.令黏聚力和内摩擦角的变化斜率分别为 k 和 l ,含水率 12.8%、14.8%和 16.8%试样分别标记为 A、B、C,并与含水率 $\pm 1\%$ 的试样记为一组.以含水率 12.8%试样为例,其与 11.8%和 13.8%试样黏聚力值连线的斜率分别记为 k_{A-1} 和 k_{A-2} ,其余类同.可以看出,黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而非线性减小.黏聚力随含水率的变化幅度表现为 $k_{A-1} < k_{A-2}$, $k_{B-1} < k_{B-2}$, $k_{C-1} > k_{C-2}$,含水率对黏聚力的影响主要包括凝聚作用和润滑作用,前者指水膜联结,随着水膜厚度的增大而减弱;后者反映颗粒的胶结程度.含水率超过 15.8%后黏聚力有一相对显著的陡降现象,是颗粒间凝聚作用基本丧失引起的,接近塑限之后,含水率对黏聚力的影响主要为润滑作用,变化幅度由此相对变缓.

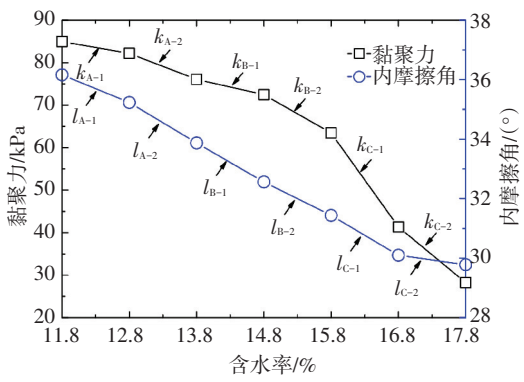


图 9 试样抗剪强度指标随含水率的变化规律
Fig. 9 Relationship between cohesion and internal friction angle of samples versus moisture contents

那么,对于黏聚力的冻融循环效应,由 $k_{A-1}<k_{A-2}$ 和 $k_{B-1}<k_{B-2}$ 可知含水率 12.8% 和 14.8% 试样含水率减小区的黏聚力变化幅度相比含水率增大区要小,即引起试样黏聚力的减小.因此,在干密度和水分重分布的双重劣化作用下,含水率 12.8% 和 14.8% 试样黏聚力呈逐渐减小的规律.但是, $k_{C-1}>k_{C-2}$,说明水分重分布对含水率 16.8% 试样黏聚力起强化作用.由此,含水率 16.8% 试样在冻融循环 1~6 次时,水分重分布对黏聚力的强化作用相比干密度的劣化作用占优势,黏聚力综合表现为逐渐增大;之后随着水分迁移量的减小,干密度的劣化作用开始占主导地位,黏聚力转而逐渐减小.

3.2 内摩擦角

冻融循环下 3 种含水率试样内摩擦角的试验结果见表 5.图 10 为内摩擦角增量随冻融次数的变化规律.可以看出,3 种试样内摩擦角的变化规律各不相同,含水率 12.8% 试样呈先减小、后趋于稳定的规律.含水率 14.8% 试样呈先减小、后增大、再减小的规律,且整体减小幅度相比含水率 12.8% 试样要大.含水率 16.8% 试样则呈先增大、后减小、再增大的规律,整体呈增大趋势.

表 5 冻融循环下试样内摩擦角的试验结果
Tab.5 Internal friction angle of samples after freeze-thaw cycling (°)

含水率/%	0 次	1 次	3 次	6 次	9 次	12 次	15 次
12.8	35.23	35.07	35.07	35.16	35.08	35.10	35.09
14.8	32.56	32.18	31.86	31.60	31.65	31.86	31.75
16.8	30.10	30.84	31.34	31.41	31.28	31.35	31.39

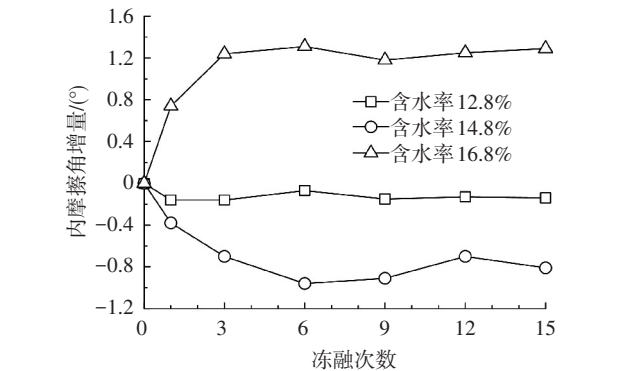


图 10 试样内摩擦角增量随冻融次数的变化规律
Fig.10 Relationship between internal friction angle increment of samples versus number of freeze-thaw cycles

关于冻融循环下土体内摩擦角的变化规律,已有文献尚无相对一致的结论,仅认为内摩擦角随冻融次数的变化不明显,多呈波动性变化特征^[5-9].本文认为,内摩擦角的波动特征是干密度和水分重分布综合作用的结果,是有规律可循的.由图 9 可知, $l_{A-1}<l_{A-2}$, $l_{B-1}>l_{B-2}$, $l_{C-1}>l_{C-2}$,且含水率超过 16.8%

后,内摩擦角的变化趋于平缓,原因在于含水率达到某一值后,粒间水膜对土颗粒的润滑作用达到极限状态.因此,含水率 12.8% 试样含水率减小区的内摩擦角变化幅度相比含水率增大区要小,干密度和水分重分布均引起内摩擦角的减小,且水分迁移量较小,由此内摩擦角呈先减小、后稳定的规律.但是,对于含水率 14.8% 和 16.8% 试样,水分重分布会引起内摩擦角的增大,且含水率越高,增大效应越显著,即干密度和水分重分布会分别引起试样内摩擦角的减小和增大.那么,对于含水率 14.8% 试样的内摩擦角,干密度的劣化作用首先占主导地位,水分重分布的强化作用在冻融循环 6~12 次时占主导地位,水分迁移稳定之后干密度的降低仍在继续,因此表现为先减小、后增大、再减小的规律.含水率 16.8% 试样中干密度和水分重分布对内摩擦角的交替控制作用则与含水率 14.8% 试样相反,由此内摩擦角表现为先增大、后减小、再增大的规律.

综上所述,对于封闭条件下的非饱和土体,冻融循环的水分迁移和冻胀过程除引起土颗粒排列和连接方式以及干密度等指标的改变外,水分重分布后含水率减小区和增大区的强度变化幅度不同,也会导致力学性质的改变.因此,对于各种冻土工程,通过设置边界条件等方法减弱冻融循环的不利影响,甚至促发和利用冻融循环强化作用是有实际意义的,其实质是控制合理的水分迁移方向.例如,路基在冻融循环下以垂直方向为主的水分迁移,不仅导致垂向附加变形,而且容易形成水平的富水层,进而引起路基在行车荷载下的剧烈破坏.那么,在增强路面隔热性和改良路基填料的同时,还可以考虑通过改变路基两侧边坡的水热边界条件使得以垂直方向为主的水分迁移向水平方向过渡,也能达到保护路基承载和变形性能的目的.

4 结 论

1) 试样相同轴向应变对应的偏应力值随着含水率的减小或围压的升高而逐渐增大,破坏形式由塑性向脆性转变.冻融循环使不同初始含水率试样的应力-应变曲线趋于接近,同时降低应变软化程度.在一定范围内,土体的冻融循环劣化效应会随着初始含水率的增大而加剧,但当含水率增大至接近塑限后,冻融循环会转而起强化作用.

2) 冻融循环过程中,由于土体干密度分布的改变和冻结、融化时温度梯度的不同,土体内部水分会向表层迁移聚集,形成含水率的增减分区分布现象.初始含水率越高,冻结锋面向内部的移动速度越小,水分迁移量越大.封闭条件下土体的水分分布在多

次冻融循环后会达到新的稳定状态。

3) 由于土体力学性质与含水率的非线性关系, 冻融循环后含水率减小区和增大区强度变化幅度的不同也会引起破坏强度的改变. 干密度和水分重分布对土体力学性质冻融循环效应的影响是同时存在的. 根据初始含水率的不同, 水分重分布可能起到强化、劣化或无影响等不同作用, 高含水率有利于强化效果的出现. 由于土体含水率和冻融循环次数的不同, 占主导地位的因素也不同, 由此会引起破坏强度和抗剪强度指标的多样化变化规律. 这一结论有助于解释土体出现强化和劣化两种相反冻融循环效应的内在原因, 并可为冻土病害防治和合理利用冻融循环强化作用提供依据。

参考文献

- [1] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] EIGENBROD K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529-537. DOI:10.1139/96-079-301.
- [3] 魏海斌, 刘寒冰, 宫亚峰, 等. 动荷载下粉煤灰土冻融损伤特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 110-113. WEI Haibin, LIU Hanbing, GONG Yafeng, et al. Dynamic properties of damage for fly ash soil after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 110-113.
- [4] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143. DOI:10.16285/j.rsm.2010.01.036. QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.01.036.
- [5] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378-2382. DOI:10.16285/j.rsm.2010.08.044. WANG Tiehang, LUO Shaofeng, LIU Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2378-2382. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.08.044.
- [6] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3585-3590. MAO Xuesong, HOU Zhongjie, WANG Weina. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3585-3590.
- [7] 张辉, 王铁行, 罗扬. 非饱和原状黄土冻融强度研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 210-214, 222. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.04.021. ZHANG Hui, WANG Tiehang, LUO Yang. Freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 210-214, 222. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.04.021.
- [8] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 767-772. DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 767-772.
- [9] 胡再强, 刘寅, 李宏儒. 冻融循环作用对黄土强度影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊2): 14-18. HU Zaiqiang, LIU Yin, LI Hongru. Influence of freezing-thawing cycles on strength of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 14-18. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.S2.003.
- [10] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. CATENA, 2003, 52(1): 1-8.
- [11] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [12] QI Jilin, MA Wei, SONG Chunxia. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 397-404.
- [13] ZHANG Ze, MA Wei, FENG Wenjie, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review [J]. Pedosphere, 2016, 26(2): 167-179.
- [14] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.04.048. SONG Chunxia, QI Jilin, LIU Fengyin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.04.048.
- [15] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1499-1503. LING Hua, YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1499-1503.
- [16] 肖军华, 刘建坤, 彭丽云, 等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 409-414. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.02.043. XIAO Junhua, LIU Jiankun, PENG Liyun, et al. Effects of compactness and water Yellow-River alluvial silt content on its mechanical behaviors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 409-414. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.02.043.
- [17] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.05.047. SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.05.047.
- [18] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [20] 苏谦, 唐第甲, 刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2990-2994. SU Qian, TANG Dijia, LIU Shen. Test on physico-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2990-2994.

(编辑 赵丽莹)