DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201710144

冻融饱和粉砂动力性能试验

唐益群[1,2],李金章[2],李 珺[2]

(1.岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学),上海 200092; 2.同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092)

摘 要: 在软土地区,例如上海,98%的地铁联络通道、地下泵房以及越江隧道采用冻结法施工,但土体的冻胀融沉对地下建筑及周围环境的影响显著.尽管冻土的物理、力学特性得到较多关注,关于饱和冻融土动力特性的研究还不是很充分.试验设计了制样-脱模装置和饱和-冻融方法,采用动三轴系统进行冻融饱和粉砂动力试验.结果表明:制样-脱模装置和冻融、饱和方法满足粉砂制样、冻融和饱和要求.重塑粉砂高度、体积冻胀率随温度降低而增大,原状粉砂规律不明显.轴向应变与动孔隙水压力密切相关,动孔隙水压力前期迅速增加,随后震荡调整,约275次附近出现峰值,随后下降并维持一个相对恒定值.冻结温度-30 ℃时,土样累积塑性变形最大,冻结温度-20 ℃时,土样累积塑性变形最小,-10 ℃取得中间值.总体上,累积塑性应变随振动频率增加而减小,围压增大、动应力幅值减少能显著减小粉砂的累积塑性变形.提出的改进Stewart半对数累积塑性变形模型可以预测冻融饱和粉砂的累积塑性变形.

关键词: 人工冻结法;冻融粉砂;动三轴试验系统;累积塑性变形

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)02-0076-08

Experimental study on dynamic cumulative axial strain performance of artificial frost-thawed saturated silty sand

TANG Yiqun[1,2], LI Jinzhang[2], LI Jun[2]

(1. China Key Laboratory of Geotechnical Engineering(Tongji University), Shanghai 200092, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the soft soil areas, such as Shanghai, artificial freezing method is adopted for constructing 98% underground engineering of metro side channel, pumping stations, and cross-river tunnels, but the method also causes notable problems of frost heaving and thaw collapsing on subway tunnel and surrounding geology environment. Although physical and mechanical properties of frozen soils have been studied, it is hardly sufficient for the research on the dynamic plastic deformation of freezing-thawing saturated silty sand. A remold-striping equipment was designed, and a method of saturating and freezing-thawing was proposed. The dynamic cumulated axial strain characteristics of freezing-thawing saturated Shanghai silty sand was studied using triaxial testing system. The experimental results reveal that compared with traditional compaction method, the remold-stripping equipment and proposed test methods provide an effect way for remolding, saturating, and freezing-thawing silty sand. The height and volume frost heaving ratio of intact saturated silty sand sample showed less influence with freezing temperature, but remolded silty sand frost heaving ratio increased as freezing temperature decreased. The axial permanent axial strain was closely related to the dynamic pore water pressure and less influenced by freezing temperature. Reducing vibration frequency resulted in smaller cumulated plastic strain. Increasing effect cell pressure and dynamic stress amplitude can significantly reduce the dynamic cumulated axial plastic strain of remolded freeing-thawing saturated sandy silt. Improved semi-logarithmic mode of cumulated permanent axial strain on freeing-thawing saturated silty sand was proposed and verified by experimental data, which could exactly forecast development trend of dynamic permanent axial strain.

Keywords: artificial freezing method; freezing-thawing silty sand; dynamic triaxial testing; dynamic permanent axial strain

随着国民经济发展,大规模的城市建设造成东部沿海软土地区城市的“城市病”(房屋密集、街道狭窄等)越来越严重,而开发地下空间、建设立体交通网络是解决拥挤状况的重要途径.在地下空间的建设中,人工地层冻结法作为一种较好的地层加固方法发挥了重要作用,主要运用于施工难度很大的地下商业街逃生通道、隧道联络通道及地下泵房、越江通道隧道等.人工冻结法作为一种绿色工法具有

收稿日期: 2017-10-31
基金项目: 国家自然科学基金(41572285)
作者简介: 唐益群(1952—),男,教授,博士生导师
通信作者: 唐益群,tangyiqun2@mail.tongji.edu.cn

安全性好、适用性强、灵活性高和经济性好等优点，但是冻结作用也改变了土体物理、力学性质，给隧道及相邻建筑物带来承载力不足、变形过大等问题，严重时导致隧道管片破损渗漏等.

由于粉砂易扰动的特性和试验技术的限制，冻融饱和粉砂的动力学特性较少进行研究. Chamberlain 等[1-2]发现冻融作用能强烈改变土的结构性，减小孔隙比. Thaddeus 等[3]通过冻融粉砂循环荷载三轴试验，得出处于冻结、融化和完全恢复等状态下的土样回弹模量差异显著，回弹模量、泊松比与应力状态、含水量以及干密度等影响因素相关. 孙谷雨等[4]得出粉砂导热系数随冻结温度降低、含水率增加而增大，冻胀率、融沉系数较小. 应力-应变曲线具有峰值且表现出应变软化特性. Mahmoud 等[5]探究了土工织物增强土的冻融特性. Li Jun 等[6-7]研究了冻融饱和软黏土蠕变和动力特性，提出双曲线模型适用于表达冻融土的动应力应变关系. 地铁联络通道、地下商场施工或隧道修复一般都采用人工冻结法. 人工冻结法改变了砂性土的土体结构，引起砂性土层的变形，造成隧道轴线的变形和地面沉降. 因此，在人工冻结法设计与施工中，需要进行饱和冻融粉砂动力特性变化规律和影响因素的研究，探讨相应的影响规律，加深工程技术人员对冻融作用的认识，从而为冻结法设计与施工提供理论依据.

饱和原装粉砂含有不均匀分布的粉土夹层. 为了获得冻融饱和粉砂累计变形特征及其一般规律，设计了密实粉砂制样-脱模装置，提出相应的冻融、饱和试验方法. 通过制样脱模设备、饱和冻结方法和动态三轴试验系统对重塑饱和冻融粉砂进行了动三轴试验，对粉砂的冻胀率及轴向累积塑性应变进行了研究.

1　制样装置

1.1　重塑粉砂制样、脱模设备

砂土取样过程中极易受到扰动，同时试验室削样、装样过程容易对砂性土产生较严重扰动，影响土样物理、力学参数的准确获取，对后期工程设计、施工造成风险. 在室内重塑砂土三轴土样时，传统击实方法容易引起应力释放、受力不均匀等问题. 对于砂土来说，密实样和松散样的物理、力学性质相差较远，因此，特别需要能够精确制备无黏性三轴土样的制样装置.

密实砂性土的三轴土样制样装置包括上刚性梁、刚性底座、刚性螺纹柱、上部加力机构、制样筒及加载块组合. 刚性底座中部设有固定制样筒的约束卡槽，上刚性梁通过刚性螺纹柱与刚性底座相连，并可上、下移动，上刚性梁中部设有内螺纹孔，加力机构穿过内螺纹孔和 T 型螺母，并通过加载块对制样筒内部土样施加轴力. 脱模时，将脱模器置于手动液压千斤顶下端，缓慢压出土样. 脱模器由导向套筒、脱模块、保护半膜和上加载盖组成. 详细设计见图 1.

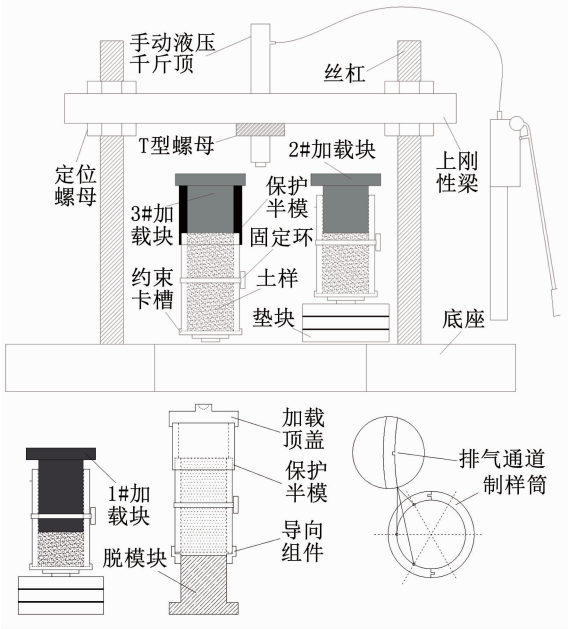


图 1　密实砂土制样、脱模装置

Fig. 1　Device for remolding and stripping dense silty sand

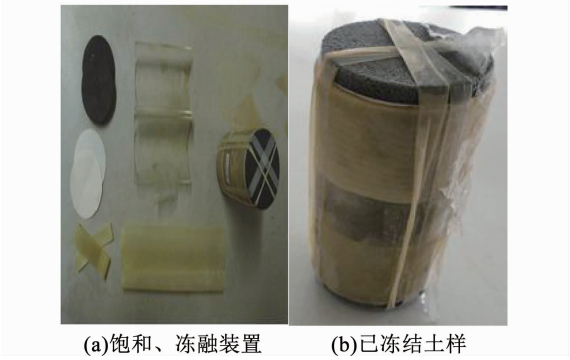
1.2　饱和-冻融装置

粉砂具有典型的遇水崩解特性，饱和粉砂极易扰动. 为了获得冻融饱和砂质粉土的冻胀参数，试验设计了一种粉砂饱和、冻融装置. 该装置由以下几部分组成：能自由开合的两半模，作为支撑骨架保护土样；横向、纵向扎带，透水石和滤纸等. 冻结试验设备采用可控制温度的 DW-40 型低温试验箱，在无外界水源补给条件下对土样进行三向冻结. 根据和礼红等[8]所做研究，当冻结温度设定为 -15 ℃时，冻结稳定时间可确定为 24 h，为保证土样完全冻结，统一设定冻结时间为 60 h. 土样完全冻结后测量其径向、高度尺寸. 最后将冻结土样置于 15 ℃恒温蒸馏水水槽中进行融化，时间设定为 24 h. 图 2 右侧是已经完成冻结的饱和粉砂三轴土样.

1.3　粉土制样及质量评价

具体制样过程：1）箍紧制样筒，内壁涂抹凡士林；2）将制样筒卡入刚性底座的卡槽内，调整上刚性梁高度至合适位置；3）选择精度合适的电子秤，称量重塑土样（直径 39.1 mm，高度 80 mm）所需干土质量；4）将土样平均分成 3 份，分别加入干土质量 5% ~ 10% 的蒸馏水，拌和均匀；4）湿土养护 48 h，取一份湿土装入制样筒内，使用 1#加载快和

上部加力机构进行底层土样压实,土样压缩至制样筒高度1/3处;5)压实后保持1~2 min,撤去加载块,将土样结合面凿毛处理,继续填入1份湿土样至制样筒内,采用2#号加载块压实,土样压缩至制样筒高度2/3处;6)压实后保持3~5 min,撤去加载块,凿毛土样结合面;7)在制样筒上放置40 mm高加载块固定筒,继续填入1份湿土样至制样筒内,使用3#加载块压实土样上部;8)将含有重塑土样的制样筒,按照脱模器的组装顺序,放入反力架内,匀速加载,将土样压入脱模器保护半模,取出保护半模,得到重塑试样.



(a)饱和、冻融装置　　(b)已冻结土样

图2　粉砂饱和-冻融装置

Fig. 2　Device for conducting saturated and freezing - thawing test on silty sand

土样质量评价. Lunne等[9]指出孔隙变化率可以反映土样扰动程度,并提出$\Delta e/e_0$在0.04~0.07时为良好土样. 重塑土样加载至原位有效应力时,孔隙比变化率均在0.06左右,弯曲元剪切波速测试值相差10%以内,重塑土样质量良好.

2　试验概况

2.1　试验材料

土样选取上海市地铁一号线附近②3~2层,取土深度为5~15 m. 土样的颗粒级配组成:黏粒(<0.005 mm)、粉粒(0.005~0.075 mm)与砂粒(0.075~0.25 mm)含量分别占土样总质量的0.3%,30.96%和68.74%. 按照《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)(2009年版)和上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》(DGJ08-37—2012)的有关规定,试验土样可以归类为粉砂. 原状粉砂含云母,灰色,底部夹较多薄层黏性土,局部为细砂,土质不均匀. 呈稍密~中密状态,属中等压缩性. 土体的其他物理特性见表1.

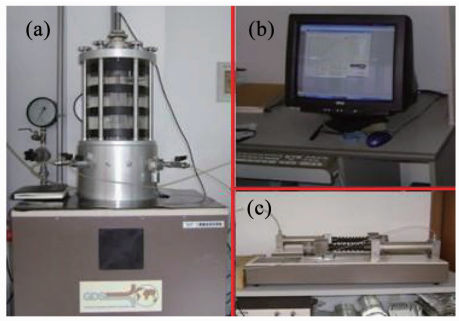
2.2　试验仪器

动三轴试验是通过对处于三轴应力状态的试件施加轴向动应力,研究饱和土样在不同试验条件下的动强度及变形特性. 仪器采用英国GDS(geotechnical digital systems)公司动三轴测试系统,主要技术指标:轴力,10 kN;位移,±25 mm;频率,0~5 Hz;围压,1 MPa;应变范围10^{-4}~10^{-2};竖向振动;可施加简谐波、方波和自定义波形. 动三轴试验测试系统见图3.

表1　粉砂基本物理力学指标

Tab. 1　Physical and mechanical indices of samples

含水量 w/%	孔隙比 e	相对体积质量 G_s	压缩系数/MPa^{-1}	体积质量/$(kg\cdot m^{-3})$	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
31.5	0.87	2.69	0.19	18.6	33.5	2



(a)压力室(b)动三轴操作系统(c)压力控制器

图3　多功能动三轴测试系统

Fig. 3　Multi-function dynamic tri-axial test systems

2.3　试验方案

试样采用偏压固结方式,K_0取为0.5,有效轴向压力80 kPa,对应的围压为40 kPa. 动应力基准值为30 kPa,动应力幅值采用10 kPa、20 kPa和30 kPa.

根据张曦等[10]现场实测资料,通过对上海地铁2号线静安寺站—江苏路站钻孔埋设仪器进行现场监测,得到地铁列车进过时引起隧道周围第4层淤泥质黏土(平均埋深12 m左右)土体响应波形图,分析得出响应频率存在高频区段[2.4~2.6 Hz]和低频区段[0.4~0.6 Hz]. 考虑到荷载频率是动累积变形试验中的关键参数并综合对比分析的需要,选定荷载频率0.2,0.5,1,1.5,2,2.5 Hz模拟地铁列车循环动荷载对应的土体响应频率参数. 加载波形采用正弦波,单级循环加载. 具体试验方案详见表2.

2.4　试验步骤

1)土样制作、饱和及冻融过程. 原状样:按照直径39.1 mm,高度80 mm的试样尺寸要求削样;装入饱和-冻融装置放进真空饱和器进行饱和;采用DW-40型低温试验箱施加冻结作用;测量高度和体积冻胀参数,将土样置于恒温蒸馏水中进行融化. 重塑样:天然土样自然风干,测定风干含水率;计算三轴土样(39.1 mm×80 mm)所需干土质量,分成3份

并加 8% 干土质量的蒸馏水拌匀；养护 48 h 后取出湿土，分 3 层均匀装入制样器，注意层间凿毛；利用脱模器将土样脱出，测量重塑土样尺寸；其余步骤同原状土样. 2）试样安装. 3）动三轴试验.

动荷载基准值的选择：黄耿彩[11]考虑了地铁隧道实际埋深状况，取隧道底部土体的动应力幅值为 20 kPa ~ 40 kPa（(30 ± 10) kPa），张勇[12]认为地铁振动幅值应在 10 kPa ~ 45 kPa，因此，选定动应力基准值为 30 kPa，动应力幅值分别选用 10 kPa，20 kPa 和 30 kPa.

表 2　循环加载试验方案

Tab. 2　Scheme of un-drained dynamic cyclic tri-axial test and control parameters

轴向压力/kPa	围压/kPa	反压/kPa	冻结温度/℃	动应力幅值/kPa	振动频率/Hz	振动次数	备注
450 + 30	425	400	- 20	10	0.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	10	0.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	20	0.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	30	0.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	10	0.2	5 000	基准试验参数：轴向压力（480 + 30）kPa；围压 440 kPa；反压 400 kPa；冻结温度 - 20 ℃；振动频率 0.5 Hz；动应力幅值 10 kPa
480 + 30	440	400	- 20	10	1.0	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	10	1.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	10	2.0	5 000	
480 + 30	440	400	- 20	10	2.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 10	10	0.5	5 000	
480 + 30	440	400	- 30	10	0.5	5 000	
530 + 30	465	400	- 20	10	0.5	5 000	

3　结果分析

图 4（a）是典型循环荷载作用下重塑饱和粉砂轴向应变与作用次数间的关系曲线（围压：40 kPa；冻结温度：- 20 ℃；振幅：0. 5 Hz；动应力幅值：10 kPa），图中阴影部分表示回弹应变 ε_r，阴影下部区域表示累积塑性应变 ε_p，ε_t 为总应变即轴向应变. 无特别说明的塑性应变均指累积塑性变形 ε_p.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_r. \tag{1}$$

由图 4 可以看出，循环荷载作用下砂质粉土轴向应变具有线性发展—快速增长—逐渐稳定 3 阶段的发展变化规律，开始阶段应变迅速增大但增长速率逐渐减小，经历约 1 000 次循环后逐渐稳定，增长速率基本保持定值，应变匀速增加. 由于循环次数的限制（5 000 次），试验没有出现增长速率趋于零、总应变趋于稳定值的情况. 对于累积塑性变形 ε_p，变化规律同轴向变形，最后 1 000 次循环荷载作用下的变形值小于 0. 005%，可以认为是一种动态稳定状态. 土体累积塑性应变发展基本分为两个阶段. 首先是快速增长阶段，为 1 ~ 475 次循环振动次数阶段，期间应变迅速增加，应变速率最大并逐渐衰减，此阶段产生的累积塑性应变占总应变的 75% ~ 80%. 第二阶段同样延续上一阶段的发展趋势，累积变形增长速率大大减小，最终变形速率逐渐趋于稳定.

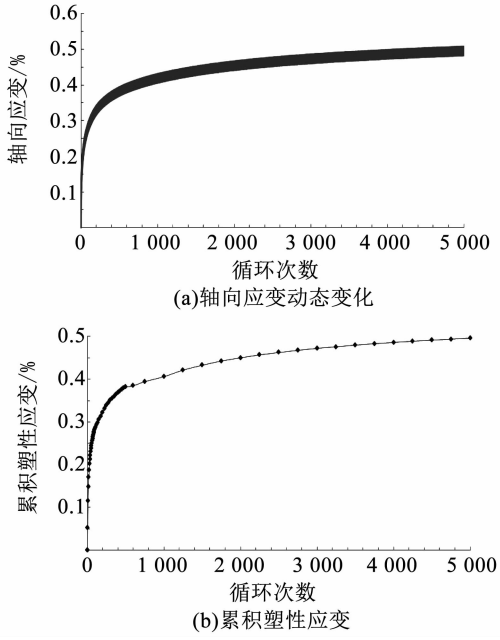


图 4　冻融饱和粉砂轴向、累积塑性应变曲线

Fig. 4　Curve of accumulated total axial strain, accumulated axial strain about freezing-thawing silty sand

图 5（a）为塑性应变增长速率与循环次数的关系，可以得出随着加载次数的增多，塑性应变增长率快速衰减，至 45 次左右时已经衰减至 1×10^{-4}，随后塑性应变增量动态调整并逐渐趋于稳定. 在循环次数为 150 次、1 250 次时分别出现一小一大两个峰

值,初步分析第一个峰值系土体有效应力减小、土体结构改变造成;第二个峰值由于动孔隙水压力下降与动荷载向土样下部传递形成. 动孔隙水压力变化规律比较明显,前期迅速增加,随后震荡调整,约 275 次附近出现峰值;循环次数 750 ~ 1 250 存在一个下降段,然后逐渐上升并维持在 2.5 kPa 附近.

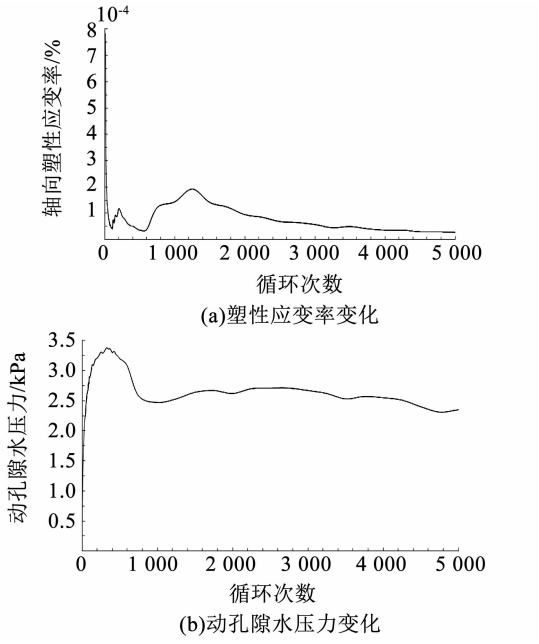


图 5 冻融饱和粉砂回弹变形、动孔隙水压力变化曲线

Fig. 5 Curves of changing rate of plastic strain and dynamic pore-water pressure of the freezing-thawing silty sand

3.1 冻胀率

人工冻结法试验中,土样冻胀率是一个非常重要的参数,包含高度冻胀率、直径冻胀率和体积冻胀率. 这里定义的冻胀率指的是无侧限冻胀率,即冻融前后饱和粉砂高度、直径及体积的改变量与原状饱和土样相应尺寸之比. 鉴于饱和粉砂直径冻胀率不太明显(2% 左右),这里仅考虑重塑土样的高度冻胀率及体积冻胀率,并与原状饱和粉砂进行比较. 如图 6 所示,重塑土样高度冻胀率随冻结温度的降低(-10 ℃→ -20 ℃→ -30 ℃)逐渐增大,原状土样存在的固有结构性和应力历史导致其高度冻胀率与冻结温度没有明显的规律性;原状和重塑冻融饱和粉砂高度冻胀率均在 -20 ℃冻结温度作用下取得较小值. 重塑土样冻结温度由 -10 ℃降至 -20 ℃时,体积冻胀率缓慢增加, -20 ℃降至 -30 ℃时快速增大,原状饱和粉砂的非均匀性导致其体积冻胀率随冻结温度降低呈先减小后增大的趋势;原状和重塑冻融饱和粉砂体积冻胀率均在 -20 ℃冻结温度作用下取得较小值. 重塑土样的高度和体积冻胀率规律性明显,高度冻胀率小于原状土样,体积冻胀率均大于原状土样. 详见图 7.

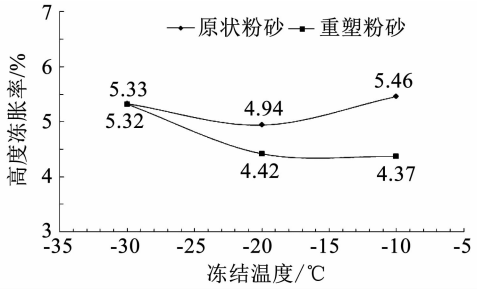


图 6 高度冻胀率

Fig. 6 Height frost-heave rate

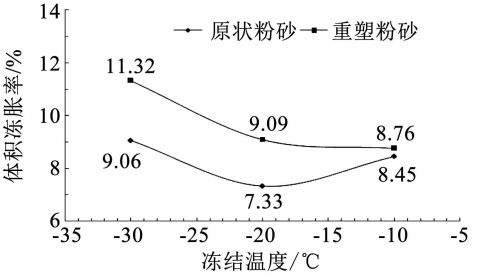


图 7 体积冻胀率

Fig. 7 Volume frost-heave rate

因此,在满足工程加固要求的前提下,应尽可能选择冻结温度 -20 ℃,减小冻结作用造成的高度及体积改变,从而间接降低人工冻结法融沉带来的负面效应.

3.2 重塑冻融饱和粉砂动累积变形特性

试验中基准试验参数:有效围压 40 kPa,冻结温度 -20 ℃,动应力幅值 10 kPa,振动频率 0.5 Hz. 当变换某个试验变量时,其他参数保持不变.

3.2.1 不同冻结温度条件下累积变形特性

不同冻结温度下重塑冻融饱和粉砂的累积塑性变形变化见图 8,可以得到如下规律:冻结温度对饱和粉砂的轴向变形特性影响较小. 冻结温度为 -30 ℃时,土样累积塑性变形最大,冻结温度为 -20 ℃时,土样累积塑性变形最小, -10 ℃取得中间值.

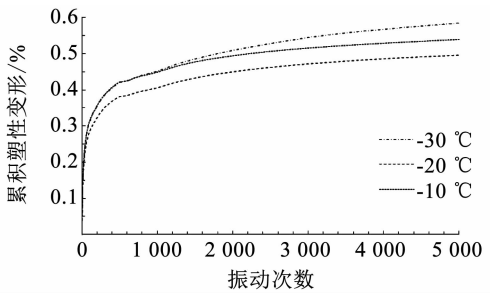


图 8 不同冻结温度下累积塑性应变变化

Fig. 8 Accumulated axial strain with respect to different freezing temperatures

3.2.2 不同围压条件下累积变形特性

如图 9 所示,改变不同的固结条件,冻融饱和粉

砂累积塑性变形随着有效围压的增大而减小. 有效围压 65 kPa 下的累积塑性变形仅相当于有效围压 40 kPa、25 kPa 的 67% 和 41%. 因此，增加粉砂的有效围压可以显著改善冻融饱和粉砂的变形性能.

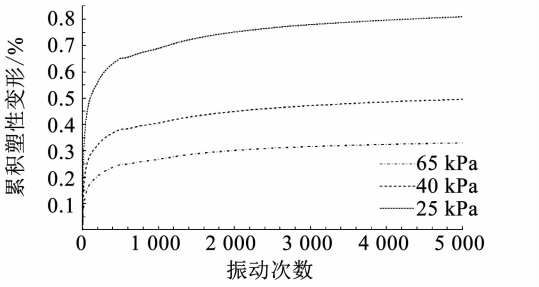


图 9　不同围压下累积塑性应变变化

Fig. 9　Accumulated axial strain with different cell pressures

3.2.3　不同动应力幅值条件下累积变形特性

如图 10 所示，动应力幅值显著影响冻融饱和粉砂的累积塑性变形特性. 随着动应力幅值的增加，累积塑性应变呈现加速发展的趋势. 10 kPa 动应力幅值下的动累积塑性总变形仅占 20 kPa、30 kPa 时的 49%，22%，且变形稳定需要 的时间更长久.

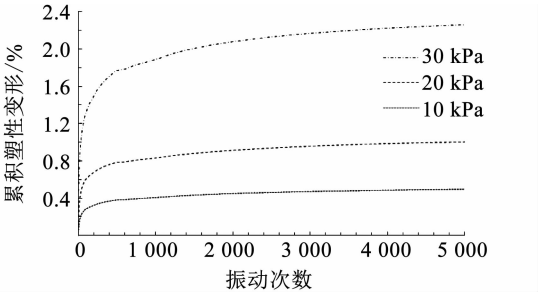


图 10　不同动应力幅值下累积塑性应变变化

Fig. 10　Accumulated axial strain with different cyclic stress amplitudes

3.2.4　不同频率条件下累积变形特性

改变振动荷载频率，由 0.2 Hz 增加至 2.5 Hz，可以得出如图 11 所示的规律：总体上，冻融饱和粉砂累积塑性应变随振动频率增加，0.2 ~ 1.0 Hz 区间呈现曲线加速下降趋势，1 ~ 2.5 Hz 近似线性比例减小. 冻融饱和粉砂的累积塑性变形特性对振动频率 0.5 Hz 比较不敏感.

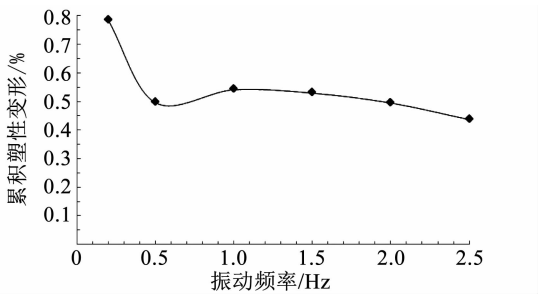


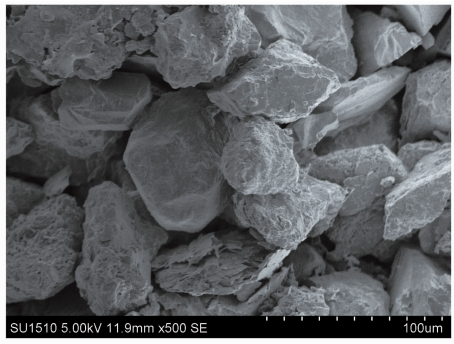
图 11　不同振动频率下累积塑性应变变化

Fig. 11　Accumulated axial strain with loading frequency

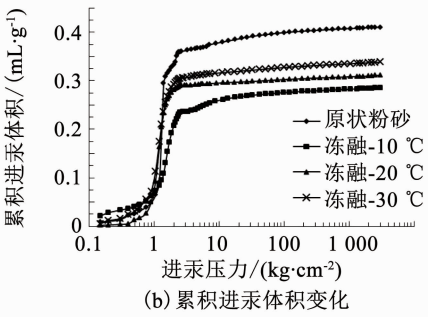
综上，动应力幅值能显著改变冻融饱和粉砂的累积塑性变形性能，有效围压次之，冻结温度和振动频率的影响较小. 具体来说，饱和粉砂塑性累积变形基本随冻结温度的降低而减小；增大土体约束，能显著减小轴向累积应变的发展；动应力幅值越大，循环荷载能量越大，转移到土体上的动能也就越大，土体产生较大的变形；相同条件下，累积塑性应变随振动频率增加而减小.

3.3　机理分析

Kværnø 等[13]试验证实冻融作用破坏土粒的黏结力，尤其粉性土的抵抗冲刷性能降低较大. Dagesse[14]认为冻融作用降低土体黏聚体的聚合稳定性. Thaddeus 等[15]通过冻融粉砂循环荷载三轴试验得出，处于冻结、融化和完全恢复等状态下的土样回弹模量差异显著，回弹模量、泊松比与应力状态、含水量以及干密度等影响因素相关. 研究表明，土体的冻融过程会改变颗粒间的结构联结、排列方式，从而改变土样的宏观力学性质. 如图 12(a)所示，冻融粉砂基本由砂粒和粉粒组成，局部夹杂叠层状黏土颗粒. 砂粒呈光滑近圆粒状或不规则片状，粉粒表面有裂缝呈粗糙近圆粒状，薄片状黏土颗粒层间存在较大孔隙. 粒间接触方式以点点接触方式为主，形成不稳定的架空结构，孔隙较大. 土体颗粒完整性好，粗糙粉粒和光滑砂粒交错分布.



(a) 扫描电镜图片



(b) 累积进汞体积变化

图 12　冻融粉砂扫描电镜图像及累积进汞体积曲线

Fig. 12　Photo of scanning electron microscope and curve of accumulated mercury intrusion for freezing-thawing silty sand

图 12(b)反映了不同冻结温度条件下冻融粉砂

微观结构变化. 相对于原状粉砂,冻融土的总进汞体积明显减少,且随着冻结温度的降低而减小. 可以解释为冻融作用后,粉土颗粒发生破碎、位移或错动,土体受到压缩,孔隙变化造成总孔隙体积减小,进汞压力阈值变化不大. 分析累积进汞曲线,进汞压力小于 2.11 kg/cm^2 主要是粒间孔隙(shear,1993)的填充,2.11 ~ 2.81 kg/cm^2 存在短暂稳定状态,进汞压力大于 2.81 kg/cm^2 主要是粒内孔隙的填充. 冻融作用增大了粒间孔隙体积,粒内孔隙体积随着冻结温度的下降呈现先减小后增大的趋势.

基于上述分析可知,为了防止地铁隧道轴线方向过大变形导致开裂,对采用人工冻结法施工的隧道周围土体进行加固是必要的;地铁运营相当长的时间内,地铁隧道周围土体会存在结构单元之间的压密过程,表现为长期附加沉降的增加. 为避免过大的长期沉降,应采取一定的隔振措施,将传递到土体的荷载控制在一定范围内,以减小地铁运营荷载对周围土体的影响.

3.4 累积塑性应变模型

通常情况下,原状土累积塑性应变变化可以采用 Monismish 指数模型[16] 进行预测. 该经验模型公式表达为:$\varepsilon_p = aN^b$. 具体参数意义详见相关文献. 该公式揭示土体塑性变形随循环加载次数的增大而持续增加,直至破坏,没有衰减阶段,与试验得到的逐渐稳定的应变曲线不符合,因此,构建冻融饱和粉砂累积塑性变形模型时有必要考虑变形的衰减性. 基于 Stewart 模型[17],根据冻融饱和粉砂动累积塑性变形的分阶段变形规律,提出改进的半对数累积塑性变形模型. 具体表达式如下:

$$\varepsilon_p = A\ln N + B/N + C. \tag{2}$$

式中:ε_p为累积塑性应变,N 为循环荷载加载次数,A、B、C 为与土体物理、力学性质有关的参数. 采用有效围压 80 kPa, 冻结温度 − 20 ℃, 振动频率 0.5 Hz,施加不同动应力幅值时冻融土的累积塑性应变试验结果验证公式的合理性. 图 13 为试验值与模型拟合曲线的对比(围压:40 kPa;冻结温度:−20 ℃;振幅:0.5 Hz;动应力幅值:10 kPa),表 3 结果显示拟合相关系数均在 0.99 以上,拟合效果良好.

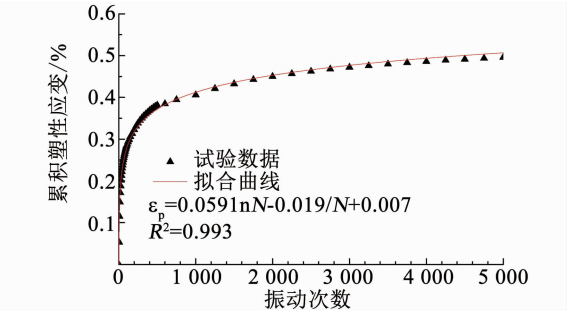


图 13 累积塑性应变试验值与模型拟合曲线对比

Fig. 13 Curve of fitting formula with freezing temperature

表 3 改进的 Stewart 半对数累积塑性变形模型拟合结果

Tab. 3 Specific parameters of the equation of the fitted curve

围压/kPa	冻结温度/℃	动应力幅值/kPa	振动频率/Hz	拟合公式	相关系数 R^2
50	−20	10	0.5	$\varepsilon_p = 0.089 \times \ln N - 0.101/N + 0.079$	0.989
80	−20	10	0.5	$\varepsilon_p = 0.059 \times \ln N - 0.019/N + 0.007$	0.993
80	−20	20	0.5	$\varepsilon_p = 0.110 \times \ln N - 0.107/N + 0.087$	0.994
80	−20	30	0.5	$\varepsilon_p = 0.257 \times \ln N - 0.150/N + 0.127$	0.997
80	−20	10	1.0	$\varepsilon_p = 0.069 \times \ln N + 0.019/N - 0.030$	0.995
80	−20	10	2.5	$\varepsilon_p = 0.060 \times \ln N + 0.055/N - 0.062$	0.996
80	−10	10	0.5	$\varepsilon_p = 0.064 \times \ln N - 0.025/N + 0.010\ 7$	0.990
80	−30	10	0.5	$\varepsilon_p = 0.071 \times \ln N + 0.016/N - 0.025$	0.996
130	−20	10	0.5	$\varepsilon_p = 0.043 \times \ln N + 0.022/N - 0.030$	0.995

4 结 论

1)重塑粉砂高度、体积冻胀率随着冻结温度降低而增大. 具有结构性的原状粉砂高度冻胀率大于重塑粉砂,体积冻胀率小于重塑粉砂,二者受冻结温度的影响不明显.

2)冻融饱和粉砂轴向应变随动孔隙水压力的变化可分为 4 个阶段:前期迅速增长且随着孔隙水压力上升而衰减;曲线增长并趋于稳定阶段,动孔隙水压力震荡调整;重新加速增长段,动孔隙水压力下降;稳定增长阶段,动孔隙水压力保持相对稳定.

3)动应力幅值、有效围压显著影响冻融饱和粉砂累积塑性变形;冻结温度影响不大,随动荷载频率增加累积塑性变形近似呈对数规律减小.

4)提出一种改进的 Stewart 半对数模型,能较准确地估算冻融饱和砂质粉土的动累积塑性变形.

参考文献

[1] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 73. DOI:10.1016/0013-7952(79)90022-X

[2] CHAMBERLAIN E J. Frost susceptibility of soil, review of index tests[R]. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Monograph 81-2. U.S. New Hampshire, 1981

[3] JOHNSON T C, COLE D M, CHAMBERLAIN E J. Effect of freeze-thaw cycles on resilient properties of fine-grained soils [J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 247. DOI:10.1016/0013-7952(79)90036-X

[4] 孙谷雨. 南京地铁典型土层冻土热物理力学特性研究[D]. 南京：南京林业大学, 2013
SUN Guyu. The research on Nanjing subway typical soil frozen thermal physical and mechanical property[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013

[5] MAHMOUD G, MAHYA R. Freeze-thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 89: 22. DOI:10.1016/j.coldregions.2013.01.002

[6] LI J, TANG Y, YANG P, et al. Dynamic properties of freezing-thawing muddy clay surrounding subway tunnel in Shanghai[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6): 5341. DOI:10.1007/s12665-015-4546-9

[7] TANG Y, LI J, WAN P, et al. Resilient and plastic strain behavior of freezing-thawing mucky clay under subway loading in Shanghai [J]. Natural Hazards, 2014, 72(2): 771. DOI:10.1007/s11069-014-1036-4

[8] 和礼红，汪稔，石祥锋. 冻土结构性研究方法初探[J]. 岩土力学, 2003(s2): 148
HE Lihong, WANG Ren, SHI Xiangfeng. Preliminary discussion of studying methods about frozen soil structural character[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(s2): 148. DOI:10.16285/j.rsm.2003.s2.034

[9] JOHNSON T C, COLE D M, CHAMBERLAIN E J. Effect of freeze-thaw cycles on resilient properties of fine-grained soils [J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 247. DOI:10.1016/0013-7952(79)90036-X

[10] 张曦，唐益群，周念清，等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2007(2): 85
ZHANG Xi, TANG Yiqun, ZHOU Nianqing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(2): 85. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2007.02.015

[11] 黄耿彩. 受扰动地铁隧道土体在列车周期性振动荷载下位移规律的研究[D]. 上海：同济大学, 2007
HUANG Gengcai. Study on displacement law under periodic load induced by train on the turbulent soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2007

[12] 张勇. 地铁区间隧道上方实测振动波分析[J]. 工程技术, 2016(3): 286
ZHANG Yong. Analysis of measured vibration wave on the top of subway tunnel[J]. Journal of Engineering Technology, 2016(3): 286

[13] KVÆMØ S H, ØYGARDEN L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. Catena, 2006, 67(3): 175. DOI:10.1016/j.catena.2006.03.011

[14] DAGESSE D F. Freezing cycle effects on water stability of soil aggregates[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(4): 473. DOI:10.4141/CJSS2012-046

[15] JOHNSON T C, COLE D M, CHAMBERLAIN E J. Effect of freeze-thaw cycles on resilient properties of fine-grained soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1): 247. DOI:10.1016/0013-7952(79)90036-X

[16] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated lording [J]. Transport Research Record, 1975, 537: 1

[17] STEWART H E. Permanent strain from cyclic variable-amplitude loadings[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(6): 646. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:6(646)

（编辑　刘　彤）