

不同固结度冻融软土动载下孔压模型

丁 智¹, 魏新江¹, 张孟雅², 孔勃文¹

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015;

2. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 以冻结温度和融土初始固结度为影响因素, 通过室内动三轴试验对地铁循环荷载作用下冻融软土的孔压发展规律进行研究. 结合试验数据, 建立了考虑冻结温度和融土初始固结度的影响因素的冻融土动孔压累积试验模型. 研究表明, 冻融作用改变土体内部颗粒联结形式和孔隙结构, 导致在循环荷载作用下冻融土动孔压累积速率加快; 冻结温度越低, 冻融土孔压发展速率越快, 且在振动后期的稳定孔压值越高; 冻融土初始固结度对孔压发展有影响, 初始固结度越高, 孔压发展越缓慢, 且稳定值越低; 低温冻结和低初始固结度的耦合作用加剧了冻融土孔压的累积, 使其结构进一步软化.

关键词: 循环荷载; 冻融循环; 冻结温度; 固结度; 孔压模型

中图分类号: TP15

文献标志码: A

water pressure accumulation rate of the frozen-thawed soil became faster under cyclic loading. And the lower the freezing temperature, the faster the pore pressure develops and the higher the stable pore pressure after vibrated. The impact of initial consolidation of thawing soil on the pore pressure development should be considered at the same time. The higher the initial consolidation, the slower the development of pore water pressure and the lower the stable pore pressure. The coupling effect of low temperature and low initial consolidation degree exacerbated the accumulation of pore pressure of frozen-thawed soil so that further soften the structure of soil.

Key words: cyclic loading; freeze-thaw cycles; freezing temperature; consolidation; pore pressure model

Experimental Study on the Dynamic Pore Pressure Model of Frozen-thawed Soft Clay for Different Degree of Consolidation Under Dynamic Loading

DING Zhi¹, WEI Xinjiang¹, ZHANG Mengya², KONG Bowen¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 2. China Power Engineering Consulting Group Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd, Changchun 130021, China)

Abstract: In this paper, the dynamic properties of frozen-thawed soil under metro loading were studied by dynamic triaxial test, and then obtained the development law of dynamic pore pressure. According to experimental data, this paper established a model of dynamic pore pressure which considers the freezing temperature and the initial consolidation. The study shows that: the freeze-thaw circulation could change the internal particle connection and pore structure of soil. Because of that, the dynamic pore

人工冻结法施工以其止水性好、强度高等优点, 在含水量较大的软土地区的地铁联络通道施工中加固效果良好. 但是在冻结过程中冰晶生长破坏土颗粒胶结作用, 在融化时冰晶消融所遗留的大孔隙造成结构弱化, 且孔隙水的消散速率远小于冰晶融化速率, 导致不均匀沉降的发生^[1]. 杭州地铁 1 号线联络通道多采用冻结法施工, 以某区间为例, 自 2012 年 11 月正式运营以来 6 个月内, 地铁隧道(近联络通道)沉降量达到 23.6 mm, 且变形在列车循环荷载作用下仍在继续发展.

冻融作用属于冻土工程中重要分支, 冻融过程中软土受到冷生作用和孔隙水相变作用的影响, 其结构性质将发生一定改变^[2]. 对于冻区实际工程应用, 目前对软土冻融作用的研究侧重于季节性冻土的冻胀融沉特性, 而针对地铁列车循环荷载作用下的冻融软土动力特性方面研究甚少, 唐益群等^[3]以上海某联络通道冻结法施工中原状和冻融作用后的粉质黏土为研究对象, 分析不同加载频率下冻融前

收稿日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51508506); 浙江省自然科学基金(LQ16E080008); 杭州市科技计划(20160533B94)

第一作者: 丁 智(1983—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通施工及运营对周边环境影响. E-mail: dingz@zucc.edu.cn

后土体的动应力-应变关系. 由于未考虑冻结温度和固结度等影响因素, 目前冻融软土静、动力特性研究具有一定的局限性.

从冻融作用对土体工程性质影响的角度, 主要研究则针对冻融土物理及静力学性质, 国外学者 Chamberlain 等^[4]首次对冻融循环后土体渗透性的变化进行系统的研究, 研究得知冻融循环后土体孔隙比减小, 但渗透性增大, 并得到 Zimmie 等^[5]学者的普遍证实. 王静等^[6]在对季节性冻融土的弹性模量进行分析, 指出弹性模量将在冻融过程中发生衰减, 并在经历 6~7 次冻融循环后趋于稳定. 王伟等^[7]在对杭州原状黏土进行冻融循环后力学性质的测试中也验证了这一结论.

考虑到迄今国内外尚未有学者涉足杭州地区人工冻土在融化后的动力性能研究, 基于此, 本文针对冻融软土在列车循环荷载作用下的孔压特性进行试验研究, 开展冻结温度和融土初始固结度影响下的室内循环不排水三轴试验, 研究融土在地铁循环荷载作用下的孔压累积发展规律, 为分析地铁运营期冻融软土变形规律提供理论依据.

1 试验土样

1.1 重塑土制备

为确保室内试验结果可比性和重复性, 减小由于试样均匀性差异带来的误差, 多数研究采用重塑土样. 目前, 重塑土的制备方法主要有两类: 击实法和泥浆固结法. 击实法是采用一定质量的击锤从一定高度自由坠落, 分层将土样击实. 虽然采用该方法

制样简单且时间较短, 但是击实过程中土样受力不均匀, 会导致下层土较上层土密实. 且在击实过程易将空气带入, 增加试样的不均匀性. 固结法是将烘干后的土与蒸馏水配成大于液限的泥浆, 倒入制样筒中, 在顶部施加一定的压力以加速土样的固结, 采用单向或三维排水固结法获得饱和试样. 该方法必须控制加载力大小和速率以防土体破坏, 固结时间较长, 且不易控制土样的均匀性.

本文基于真空预压原理, 用研发出的新型智能多联通道重塑土真空预压仪, 通过控制土样的含水量等, 制备均匀性更好的重塑土用于室内动三轴试验^[8]. 多联通道重塑土真空预压设备主要由三部分组成: 真空泵、真空水罐和土样制备箱, 加设智能控制显示系统, 具有以下功能: ①可以设定真空负压上下限来控制设备真空泵的工作时间; ②可以实时读取真空水罐中水位高度, 通过建立的重塑土含水率与排水量之间的关系式实现制样过程的可视化; ③可以选取参与工作的制土桶数量. 土样成形桶外部结构为圆台型钢化玻璃桶, 顶部直径为 350 mm, 底部直径为 300 mm, 高为 500 mm.

土样制备过程: 先将原土烘干, 碾碎后过筛, 加水均匀搅拌成泥浆(所加水抽真空为无气水), 确保真空泵、真空水罐和土样制备箱皆处于密封状态, 接通电源后, 由真空泵提供负压(设置为-80 kPa), 对土样制备箱中的淤泥质土进行预压固结(约 15 d). 在预压过程中真空水罐可以储存由制备箱中滤出的水分, 从而达到加速土样固结的目的. 本次试验原土取自杭州地铁二号线良渚站沿线, 多联通道重塑土真空预压设备及所制得的重塑土样如图 1 所示.

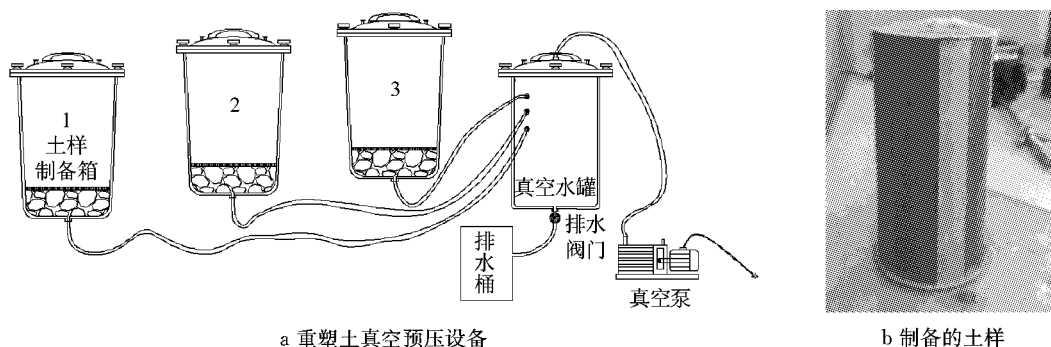


图1 多联通道重塑土真空预压设备及其制备的土样

Fig.1 The multiple unicom vacuum preloading device for remolded soil and its sample

1.2 重塑土均匀性论证

试样均匀性对土结构性质有重要影响, 采用图 2 所示荷兰 FEI 公司生产的 QUANTA FEG 650 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观测重塑土样不同高度

处水平、垂直断面的微观结构, 并对其孔隙结构参数进行对比, 论证其均匀性^[9].

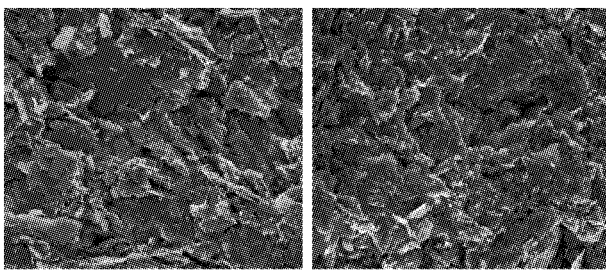
留取重塑土样的芯部, 切取长约 10 cm、断面长宽都为 1 cm 的土条进行干燥处理后, 沿试样高度方



图 2 场发射扫描电子显微镜

Fig. 2 Field emission scanning electron microscope

向,每 2 cm 选取一个水平和垂直断面作为观测面,用刻刀在断面四周刻一道划痕,沿此划痕掰开,获得新鲜的观察断面.在确保观察面不受扰动的前提下,将试样切削、打磨成长、宽、高分别为 0.5 mm,0.5 mm,2 mm 的微观试样,再用洗耳球吹去观测断面上松动的浮土颗粒.由于软黏土导电性较差,为确保微观图像的质量,为干燥试样表面喷镀一层 20~50 nm 金膜作为导电物质. SEM 试验选取 8 000 倍放大倍数,对具有代表性的区域连续拍摄 15 张照片.图 3 分别为某高度处重塑土水平和垂直断面的微观结构图像,可以看出采用通重塑土真空预压设备所制备的重塑土呈片状结构,颗粒单元之间多以边-边、边-面的方式接触,颗粒之间接触较紧密,挤压镶嵌结构明显.有孔隙发育,但是孔隙尺寸较小且分布较少,无明确定向性,主要存在于团粒和颗粒之间.



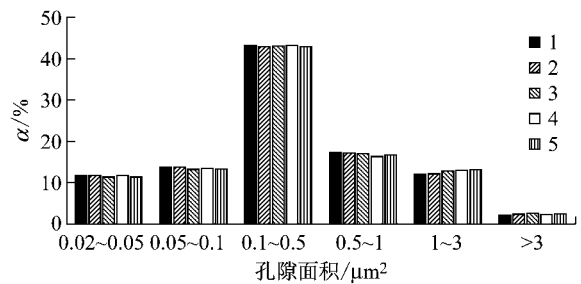
a 水平断面

b 垂直断面

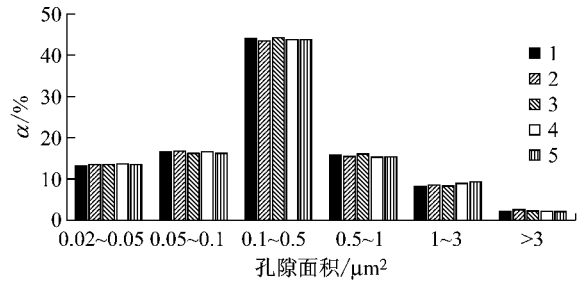
图 3 重塑土微观结构

Fig. 3 The microstructure of remolded soil

在 SEM 图像中,团粒单元体中的孔隙可以观察到,但对于微粒单元中的孔隙则较难发现,因此采用图像分析软件(IPP)对微观照片进行二值化处理,并统计各孔隙的各项特征参数.图 4 为各高度上重塑土样水平和垂直断面孔隙面积的分布情况(其中 α 为各尺寸孔隙面积占总隙面积的百分比),水平断面各组试样孔隙面积分级统计方差均小于 1.75×10^{-5} ,垂直断面各组试样孔隙面积分级统计方差均小于 1.36×10^{-5} ,可见由该设备制得的重塑土样具有较好的均匀性.



a 水平断面孔隙面积分级统计



b 垂直断面孔隙面积分级统计

图 4 重塑土孔隙面积分布

Fig. 4 The pore area distribution of remolded soil

2 冻融土的循环三轴试验方案

室内动三轴试验采用英国 GDS 动三轴试验系统,基于新型智能多联通重塑土真空预压仪制备重塑的软土试样,重塑土密度 ρ 、比重 G_s 、含水率 ω 、塑限 ω_p 、液限 ω_L 、塑性指数 I_p 如表 1 所示.重塑土冻结时间的选取依照冻结法施工按比例换算,一般冻结法施工中冻结土壁厚度约 2 m,冻结时间约 40 d,本文厚度 10 cm 的重塑土样冻结时间取 48 h 可较好模拟实际工况^[9].冻融过程依照文献[8-9]进行:将制备好的土样在设置的试验温度下进行冻结 48 h,再置于恒温恒湿养护箱中融化 48 h.将冻融后土样制备成直径和高分别为 38 mm,76 mm 的圆柱体.为确保试样的饱和度,试样饱和分 2 步进行:①真空饱和.参考土工试验规程(SL37—1999)将圆柱土样装入饱和器中,置于-0.1 MPa 的真空饱水机中抽真空饱和 3 h,并于大气压下浸泡 12 h.②分级反压饱和.将试样装入 GDS 动三轴仪中进行,分别是反压 130 kPa,围压 150 kPa,30 min;反压 200 kPa,围压 180 kPa,30 min;反压 250 kPa,围压 230 kPa,60 min.经过真空饱和及反压饱和后试样的孔隙水压力系数检测值 B 可在 5 min 内达到 0.97 以上,满足试验需求.

表 1 重塑土物理参数

Tab.1 Physical parameters of remodeling soil					
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G_s	$\omega/\%$	$\omega_p/\%$	$\omega_L/\%$	$I_p/\%$
1.81~1.83	2.75	32.9~37.5	33.4	51.6	18.2

地铁联络通道冻结法施工时冻结壁设计平均温度一般为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却介质选取 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 为研究不同冻结温度的影响,试验选取冻结温度分别为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. 考虑实际工况中冻融土超孔压在地铁运营前期未完全消散,设置不同冻融土初始固结度进行对比研究,分别选取 70%, 80%, 90% 和 100%. 为了实现不同固结程度的控制,试验采用单面排水等向固结,试验过程实时读取孔压值,基于平均固结度计算公式,通过控制超孔压消散情况来完成: $U=1-\Delta u/p$, 式中 U 为平均固结度, Δu 为超孔隙水压力, p 为有效固结压力.

地铁循环列车荷载不同于地震荷载和波浪荷载,室内动三轴试验时需要选取合适加载波形进行模拟. 以往研究中无论是交通荷载、波浪荷载还是地震荷载,在室内试验研究时,动荷载都被简化为正弦波,少数研究者使用了矩形波和三角形波;固结应力 25 kPa 到 200 kPa 不等;动应力比从 0.05 到 1.1 不等;频率从 0.01 Hz 到 8 Hz 不等;循环次数基本在 10 000 次以下,少数在 50 000 次以上. 丁智等^[10] 对比了多种形式的动荷载波形与地铁列车荷载的相似度,指出偏压正弦波能够更好地体现地铁荷载的真实性. 为了避免在没有论证的情况下选择荷载,在对比多种荷载的情况下,采用偏压正弦波荷载保留了列车荷载的性质是一种合理的选择.

选择偏压应力波模拟地铁列车荷载,偏压应力的施加与循环应力同步. 将孔压进行归一化处理, $u^* = \Delta u/p$, 循环应力比 $\tau = \sigma_d/(2p)$, 其中 σ_d 为动应力幅值,选取有效固结压力 $p = 200\text{ kPa}$ (围压 550 kPa,反压 350 kPa). 试验采用应力控制式循环加载模块,不排水动三轴试验方案如表 2 所示.

表 2 GDS 试验方案

Tab.2 Schemes of GDS test

试样编号	固结压力/kPa	循环应力比	静偏应力/kPa	频率/Hz	冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$	冻融周期	初始固结度/%	循环次数/ 10^4
C-1	200	0.2	40	1		0	100	2
C-2	200	0.2	40	1	-30	1	100	2
C-3	200	0.2	40	1	-20	1	100	2
C-4	200	0.2	40	1	-10	1	100	2
C-5	200	0.2	40	1	-30	1	90	2
C-6	200	0.2	40	1	-30	1	80	2
C-7	200	0.2	40	1	-30	1	70	2
C-8	200	0.2	40	1	-20	1	90	2
C-9	200	0.2	40	1	-20	1	80	2
C-10	200	0.2	40	1	-20	1	70	2
C-11	200	0.2	40	1	-10	1	90	2
C-12	200	0.2	40	1	-10	1	80	2
C-13	200	0.2	40	1	-10	1	70	2

3 冻融土动孔压发展规律及计算模型

3.1 冻结温度的影响

图 5 为冻结温度影响下冻融软土孔压随振次的发展情况,软土经过冻融后孔压的发展趋势与未冻融土相似,在加载初期土体内部孔隙受到挤压导致超孔压迅速累积,几乎呈线性增加;当加载周期达到 1 000 次左右,孔压的增长速度减缓,但仍有一定增长幅度;在循环加载周期达到 10 000 次左右时,孔压发展进入相对稳定状态,并最终达到稳定孔压值. 但是软土经过冻融后,加载初期孔压累积速率和后期的稳定孔压都较未冻融土有较大幅度提高. 并且对比各冻结温度下冻融土的孔压发展曲线,可以发现冻结温度越低,冻融土在加载初期的孔压发展速度越快,并且最终的稳定孔压也越大.

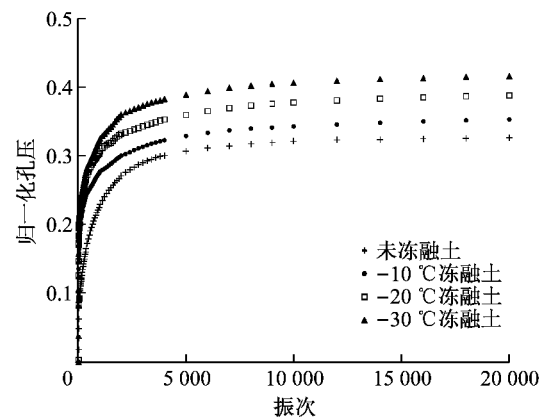


图 5 冻结温度对冻融土动孔压发展的影响

Fig. 5 The influence of freezing temperature on the development of pore pressure of frost-thawed soil

分析冻融机制对软土动力特性的影响,其原因主要在于软黏土在冻结时内部孔隙水发生相变作用,孔隙水冻结成冰晶体的过程发生一定的膨胀,破坏了周围土颗粒之间的胶结作用,也导致了微小孔隙的贯通和连接,从而使大孔隙数量增多. 而在融化时,内部颗粒结构重新调整分布并达到新的平衡孔隙比,但是冻结过程中所形成的较大孔隙却难以恢复,此时冻融土内部结构处于相对较弱的稳定状态,易受到外界扰动而发生破坏. 在循环加载时,动能转移到土体后导致内部结构平衡被打破,土体受到挤密作用,大孔隙数量明显减小,此时内部超孔压来不及消散而不断累积. 直到加载后期,循环荷载的动能与冻融土内能达到平衡,冻融土内部结构已相对密实,再次达到一个新的平衡状态,此时超孔压也基本达到稳定. 冻结温度越低,试样在冻结过程中所受到

的内部结构破坏作用越显著,孔隙率也越大,导致其在融化后结构性质弱化效应较大,受到外部动荷载作用时内部平衡更易被打破,超孔压的累积速率也就相对更快。

进一步采用 8 000 倍放大倍数 SEM 对冻融前后试样具有代表性的区域拍摄 15 张微观图像,图 6 为经历冻融前后不同冻结温度下人工冻融软土微观结构扫描图像。软黏土冻融前,如图 6a 所示,结构单元多为薄片状,颗粒之间接触较紧密,挤压镶嵌结构明显,结构单元多以边-边或边-面形式接触。由图 6b,6c 和 6d 可以看出软土经冻融后微观图像出现絮凝和蜂窝絮凝结构(椭圆标注),集合体多呈现絮状和羽毛状,图中以椭圆形标注了典型结构。同时,颗粒间孔隙也明显增多,形成结构局部弱化区。软土冻融前后微观结构的区别主要是由于冻结过程中冰晶的生长破坏了土颗粒间的联结作用,使其受到挤压而形成新的骨架结构,同时微小孔隙贯通形成了较大孔隙。而在融化过程中,冰晶的消失却不能使骨架结构得到完全恢复。

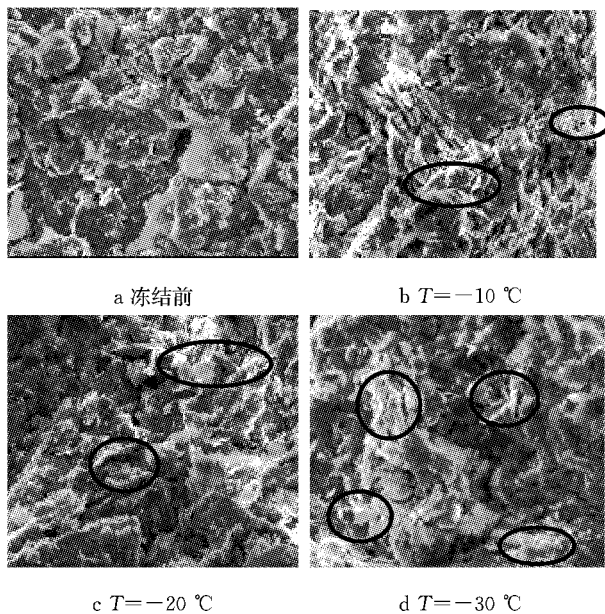


图 6 冻融前后软土微观结构形式

Fig. 6 Microstructure form of soft soil after freezing and thawing cycles

对比不同冻结温度下冻融土微观结构,可以看出冻结温度越低,融土孔隙体积越大,絮凝结构越明显。因为软土在冻结过程中,冻结温度越低,孔隙水冻结成冰的总量越大,冻胀率也就越大,意味着土体内部结构受到的破坏越显著,具体表现为颗粒间胶结作用受到破坏,微小孔隙贯通相连,导致孔隙体积增大。在融化过程中,土体微观结构无法恢复到原始

状态,所以冻融后土体结构性质受到一定程度的弱化,这也进一步解释了本文动三轴试验成果。

3.2 冻融土初始固结度的影响

魏新江等^[11]、丁智等^[12]指出地铁前期施工的扰动影响将持续到地铁运营期,初始固结度对工后长期沉降带来附加影响。而在考虑冻结法施工的长期沉降时,也需要考虑由于冻结软土在融化过程中冰透镜体的融化速率大于融化水排水的速率,超孔隙水压力来不及消散,导致循环加载前试样存在初始固结度的影响。

图 7 为初始固结度影响下各试样归一化孔压随振次的发展情况,试验通过控制固结过程中超孔压的消散情况实现初始固结度的控制。因此,对于初始固结度影响下的孔压考虑了残余孔压。即对初始固结度为 90% 的试样,加载时的残余孔压归一化值为 0.1,在循环加载过程中,孔压在残余孔压的基础上继续累积。其余固结度的试样具有相同规律。

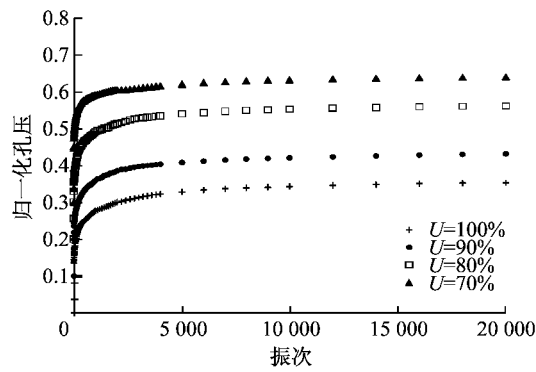
从图 7 中可以看出存在初始固结度的冻融土试样,其孔压随振次的发展趋势类似。在残余孔压的基础上,孔压在振动初期随着振次的增加而快速累积,随后速率逐渐减缓,并在加载 10 000 次左右时达到稳定值。但初始固结度越低的试样,其加载前的残余孔压越大,有效应力越低,试样软化效应越显著,导致循环荷载作用下孔压的累积发展速度越快,最终的稳定孔压也越大。相反对于固结度较高的试样,由于残余孔压较小,试样结构较为密实,因此其在加载过程中孔压发展也较为缓慢,稳定孔压值较小。

从图 7 中还可知,冻结温度越低,不同固结度冻融土稳定孔压值也越高。特别是冻结温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下,固结度为 0.7 的冻融土的稳定孔压接近于完全固结融土稳定孔压的 2 倍,若冻融区域动孔压计算仍采用未冻土或完全固结融土的动孔压计算模型,则计算结果明显变小,偏不安全。因此有必要进一步提出考虑冻结温度和初始固结度影响下的动孔压计算公式。

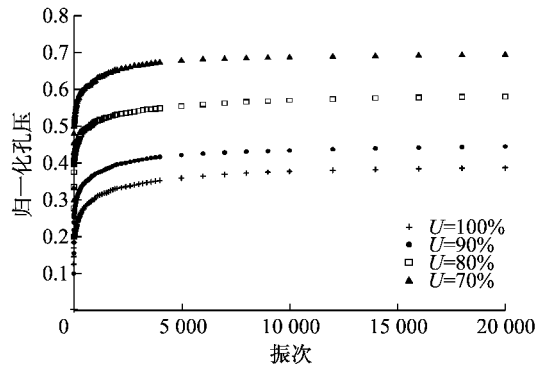
3.3 冻融土孔压模型的建立

不排水加载过程中孔隙水压力的累积情况可以反映排水条件下试样的体积变化规律^[13],因此建立冻融软土不排水循环累积孔压模型对分析动载作用下冻结法施工后地基土长期沉降具有重要意义,考虑冻结温度和冻融土初始固结度的影响也将使其更具合理性。

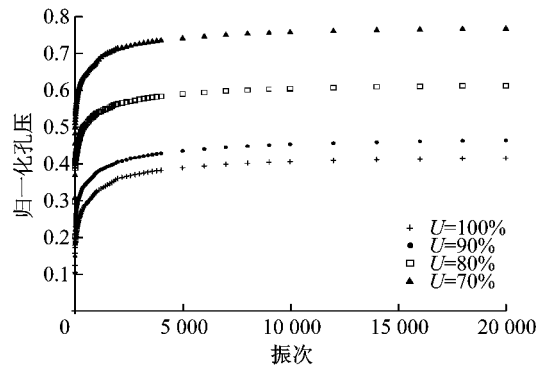
基于试验结果,以冻结温度和冻融土初始固结度为影响因子、以循环加载振次 N 为变量建立冻融



a 冻结温度-10 °C



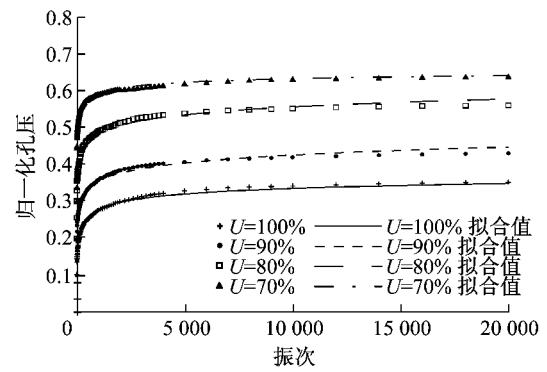
b 冻结温度-20 °C



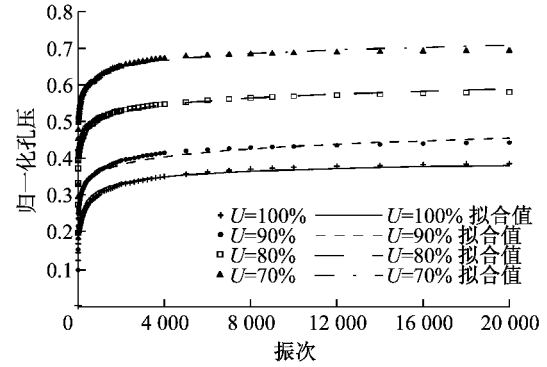
c 冻结温度-30 °C

图 7 冻融土初始固结度影响下孔压的发展规律

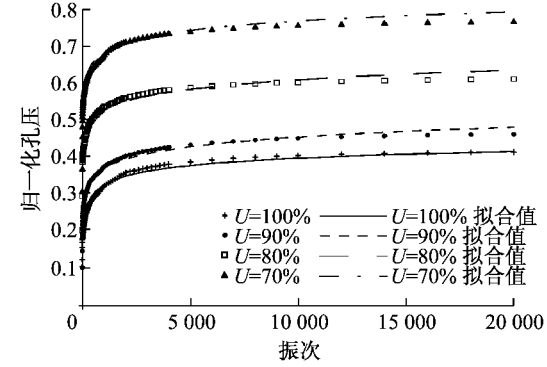
Fig.7 Regular pattern of pore pressure under different initial consolidation degree



a 冻结温度-10 °C



b 冻结温度-20 °C



c 冻结温度-30 °C

图 8 孔压模型的拟合情况

Fig.8 Fitting results of pore pressure

表 3 拟合参数

Tab.3 Fitting parameters

冻结温度	初始固结度/%	A	B	C	D
-10 °C	100	-0.008 0	0.242 5	0	-0.152 8
	90	0.001 7	0.145 7	8.271 9	-0.162 2
	80	0.000 5	0.097 2	3.770 6	-0.098 8
	70	-0.016 2	0.308 9	6.602 2	-0.165 5
-20 °C	100	-0.036 8	0.976 0	0	-0.138 5
	90	0.000 5	0.044 4	2.539 6	-0.017 5
	80	0	0.033 8	1.633 5	-0.000 4
-30 °C	70	-0.005 0	0.186 2	4.454 2	-0.060 7
	100	-0.018 9	0.645 7	0	-0.079 6
	90	0.001 9	0.058 0	3.515 5	-0.024 9
	80	0.005 0	0.092 4	6.008 7	-0.042 1
	70	-0.004 7	0.344 1	7.449 2	-0.057 3

土孔压模型,使其易于理解且具有实用性.参考魏新江等^[11]提出的饱和软黏土孔压随振次发展的对数模型和王伟等^[7]提出的冻融土应力-应变软化指数模型,建立如下复合函数模型描述冻结温度和冻融循环周期影响下的孔压 u^* 发展规律:

$$u^* = (A \cdot U^2 \cdot \ln^2(N) + B \cdot U \cdot \ln(N) + C \cdot (1-U)) \cdot \exp(-D \cdot T) \quad (1)$$

式中: T 为冻结温度; U 为融土初始固结度; A, B, C, D 均为试验拟合参数,数据拟合采用七维高科 1stOpt 软件,图 8 为式(1)对试验数据的拟合情况,拟合效果均在 98% 以上,拟合参数见表 3 所示.

从图 8 可以看出,以复合函数模型公式(1)对冻

结温度和冻融土初始固结度影响下的冻融土动孔压随振次发展的规律拟合效果良好,因此可以结合该孔压模型,利用有效应力原理对循环荷载作用下冻融土的固结变形进行分析,从而形成预测地铁列车循环荷载作用下冻融土工后长期沉降的完整体系。

考虑到列车循环动力荷载,在同等条件下尽量避免过低温度冻结和过低初始固结度,以避免冻融区域后期地铁运营引起的较大不均匀沉降,所以在冻结法施工区域地铁运营之前,需考虑融土的初始固结度,建议正式运营前其固结度宜大于 0.9。

4 结论

(1)软土经冻融后,动孔压随振次的发展模式与未冻融土类似:初期累积发展速率较快,几乎呈线性增长;随后累积速率减慢,但仍处于增加过程中;随着加载次数的增多,孔压发展最终趋于稳定,但其稳定孔压值大于未冻融软土。

(2)冻结温度对冻融土的孔压发展规律具有一定影响,冻结温度越低,冻融土孔压初期增长速率越快,并且在后期达到的稳定孔压值也越大。且冻结温度越低,微观结构变化也越显著,考虑到冻结法施工区的工后沉降,同等条件下应尽量避免过低温度冻结施工。

(3)冻融土初始固结度越低,残余孔压越大,导致加载初期孔压发展速率越快,后期稳定孔压值也越大。在冻结法施工区域地铁运营前,需考虑冻融土的初始固结度,建议正式运营前固结度宜大于 0.9。

(4)建立的复合函数孔压模型能够较好地拟合冻结温度和融土初始固结度的影响,可为分析冻结法施工工后长期沉降的预测提供理论参考。

参考文献:

- [1] ANDERSLAND O B, LADANYI B. Frozen ground engineering [M]. New York: Chapman & Hall, 2003.
- [2] 齐吉琳,程国栋,VEIMEERI P A. 冻融作用对土工程性影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887.
QI Jilin, CHENG Guodong, VEIMEERI P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8): 887.
- [3] 唐益群,沈锋,胡向东,等. 上海地区冻融后暗绿色粉质粘土本构关系与微结构研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1249.
TANG Yiqun, SHEN Feng, HU Xiangdong, *et al.* Study on dynamic constitutive relation and microstructure of melted dark green silty soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1249.
- [4] CHAMBERLAIN Edwin J, GOW Anthony J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(14): 73.
- [5] ZIMMIE T F, LA P C. Effect of freeze/thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil [C]//Hazardous and Industrial Wastes. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1990: 580-593.
- [6] 王静,刘寒冰,吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3665.
WANG Jing, LIU Hanbing, WU Chunli. Influence of freeze-thaw cycles on elastic modulus of subgrade soil with different plasticity indices[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3665.
- [7] 王伟,池旭超,张芳,等. 冻融循环对滨海软土三轴应力应变曲线软化特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 140.
WANG Wei, CHI Xuchao, ZHANG Fang, *et al.* Effect of freeze-thaw circles on softening behaviors of triaxial stress-strain curve of coastal soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 140.
- [8] 丁智,郑勇,张孟雅,等. 多联通道重塑土智能成形设备:中国, 201520723963.4[P]. 2016-01-20.
DING Zhi, ZHENG Yong, ZHANG Mengya, *et al.* The intelligent multi-channel device for remoulded soil: China, 201520723963.4[P]. 2016-01-20.
- [9] 张孟雅. 地铁循环荷载下冻融软土动力特性与微观结构试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
ZHANG Mengya. Experimental study on dynamic characteristics and microstructure of frozen-thawed soil under subway loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 丁智,张涛,魏新江,等. 地铁列车循环荷载试验验证研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 789.
DING Zhi, ZHANG Tao, WEI Xinjiang, *et al.* Experimental study on the cyclic loading of metro trains [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 789.
- [11] 魏新江,张涛,丁智,等. 地铁荷载下不同固结度软黏土的孔压试验模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2761.
WEI Xinjiang, ZHANG Tao, DING Zhi, *et al.* Experimental study of pore pressure model of soft clay with different consolidation degrees under subway loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2761.
- [12] 丁智,张涛,魏新江,等. 排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 893.
DING Zhi, ZHANG Tao, WEI Xinjiang, *et al.* Experimental study on effect of different drainage conditions on dynamic characteristics of soft clay under different degrees of condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 893.
- [13] 姚兆明,张明慧,陈军浩. 饱和软黏土循环累积孔压模型及地铁隧道路基长期沉降计算[J]. 铁道学报, 2012, 34(9): 87.
YAO Zhaoming, ZHANG Minghui, CHEN Junhao. Cyclic accumulative pore pressure explicit model of saturated soft clay and long-term settlement calculation of subway tunnel roadbed [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(9): 87.