

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.018

地铁荷载下宁波软黏土冻融水泥土 动力学特性研究*

吴 繁^{1,2}, 杨 平¹, 张雅琴¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京, 210037; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京, 210017)

摘要:在复杂软弱地层条件下,为有效抑制人工冻结冻胀融沉,可采用水泥土改良后人工冻结二次加固,水泥土冻融后的动力学特性,对地铁隧道长期运营至关重要。运用GDS动三轴仪研究水泥掺入比、振动频率及振次对冻融水泥土动应变、动弹性模量及动阻尼的影响。结果表明:冻融水泥土水泥掺入比越大,滞回圈面积越小,呈现先快后慢发展的趋势,其累积塑性应变最大减小50%;在其它条件相同情况下,动弹模随振动次数的增加而非线性减小,随振动频率升高、水泥掺入比的增大而线性增大;动阻尼比随振动次数的增加而非线性增加,随振动频率升高、水泥掺入比的增大而线性减小,并存在变化临界值;软土水泥土冻融前后的动力学特性有一定差异,一次冻融后的强度较冻融前减小6%;工程中联络通道周围产生非均质冻融水泥土水泥掺量应大于5%;地铁长期循环荷载的后期作用对软土水泥土加固冻融后的动力学特性影响很小,工程中可以不予考虑。

关键词:软土;冻融水泥土;水泥掺入比;动弹性模量;振动频率;动阻尼比

中图分类号:U45 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2132(2020)05-0818-10

Study on Dynamic Characteristics of Cement Soil of Ningbo Soft Clay in Freeze-Thawing Cycles under the Load of Metro

WU Fan^{1,2}, YANG Ping¹, ZHANG YaQin¹

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: In some special weak stratum conditions, to effectively restrain artificial freezing frost heave and thaw settlement, an improved cement soil can be used after artificial freezing second-reinforcement. The kinetic characteristics of cement soil after freeze thawing is essential to the long-term operation of the subway tunnel. In this paper, the GDS dynamic triaxial apparatus was used to study the influence of cement mixing ratio, vibration frequency and vibration time on the dynamic strain, dynamic elastic modulus and dynamic damping of cement soil subjected to freeze thawing. The results show that the greater the cement mixture ratio, the smaller the hysteresis loop area is, and the trend is initially fast and then slows down. The cumulated plastic strain decreased by 50% at maximum. Subject to the same conditions, the dynamic elastic modulus decreases non-linearly with the increase of the

* 收稿日期:2018-09-20;修回日期:2019-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51478226)、江苏省优势学科建设工程资助项目(PAPD)、江苏省研究生创新计划项目(KYCX17_0829)资助

作者简介:吴 繁(1993-),助理工程师。主要从事环境岩土与地下工程的研究设计工作。Email:565006198@qq.com

通讯作者:杨 平(1964-),教授,博导。主要从事环境岩土与地下工程的教学研究工作。Email:yangping@nifu.com.cn

number of vibration, and it increases linearly with the increase of vibration frequency and the cement mixing ratio. The dynamic damping ratio increases non-linearly with the increase of vibration frequency, and decreases non-linearly with the increase of vibration frequency and the cement mixing ratio, and there is a critical value. The dynamic characteristics of the soil before and after freezing and thawing are different. The soil strength after freezing and thawing reduces by 6%. The content of freeze thawing heterogeneous cement should be greater than 5% around the communication channel in engineering practices. The later effect of long-term cyclic loading of the subway on the dynamic behavior of cement stabilized soft soil after freeze consolidation is little and can be neglected.

Keywords: soft soil; cement soil under freeze-thaw cycles; cement mixing ratio; dynamic elastic modulus; vibration frequency; dynamic damping ratio

引言

随着我国城市轨道交通迅速发展,采用人工冻结法施工工程正朝着多样化,复杂化方向发展,其施工对周边环境的影响也日渐显现^[1]。在地下结构完成后,须对其停止冻结。土体解冻融化后,其结构和强度均会发生变化,从而出现工后沉降。目前通常采用跟踪注浆法减小沉降。但软土地层冻结法施工后地铁运营期间联络通道仍存在大量工后不均匀沉降问题,而预先进行注浆水泥土改良再冻结可有效抑制冻胀融沉,但由于注浆均匀性难以保证,造成联络通道周围产生非均质水泥土。软土地层非均质水泥土冻融后动力特性是研究解决运营期间不均匀沉降的关键问题。

有关冻融水泥土静力学的研究已有不少^[2-3]。王天亮等^[4]通过静三轴试验研究不同冻融次数、冷却温度和围压下水泥及石灰改良土的静力特性;A. Mardani-Aghabaglou等^[5]研究硫酸盐侵蚀和冻融作用的耦合作用对水泥黏土的强度和渗透特性影响,建立了无侧限抗压强度、冻融循环、水泥含量和龄期之间的经验关系。在水泥土动力学研究方面,侯永峰等^[6]通过对水泥复合土的动三轴试验,研究循环荷载作用下循环应力比、加载周期和围压对水泥复合土轴向应变的影响,并给出其与置换率的关系式;Y.Q.Cai等^[7]通过动三轴试验考虑不同掺入比和围压的变化研究水泥复合黏土的动力特性,提出一种方法来预测动弹性模量和阻尼比,并给出相对经验化公式;S.S. Sharma等^[8]通过不排水循环三轴试验,比较相近初始条件下水泥砂土和未加固砂土的剪切刚度,发现刚度的衰减与循环的次数成线性关系;杨广庆^[9]分析水泥改良土在列车振动荷载作

用下的动力特性,研究水泥改良土的临界动应力、累积塑性变形、弹性变形和回弹模量的变化规律及影响因素。王军等^[10]通过应变控制下逐级循环加载试验,分析水泥土的应力—应变关系和动模量的发展规律,通过修正的双曲线模型建立水泥融土应力—应变的经验模型;T. Eskisar等^[11]通过对循环前后改良东北黏土和素土进行动三轴试验,分析了冻融前后各种土样的累积塑性变形和临界动应力。以上文献主要研究循环荷载作用下水泥土的无侧限抗压强度和水泥土的动力特性,冻融水泥土的动力特性研究较少。仅J.K.Liu等^[12]通过动三轴试验得出反复冻融作用下水泥土动力特性较素土有明显提高,但经冻融循环后水泥土的临界动应力下降。实际工况中,联络通道周围的非均质水泥土仅发生一次冻融,这种工况下的非均质冻融水泥土的动应变、动模量和阻尼比的变化规律如何,缺乏研究。寻找最优水泥掺入比,指导现场预注浆,可为解决地铁运营期间水泥土改良冻结法施工工后的联络通道不均匀沉降控制问题提供理论依据。为此本文以宁波典型软土地层为对象,开展多因素条件下冻融水泥土动力学特性试验研究,以为地铁运营期间软土地层不均匀沉降提供理论参考和实践价值。

1 试验规划与试验方法

1.1 试验规划

地铁振动荷载作为一种长期往复的动荷载,可将其视为循环荷载。许多学者研究了地铁振动荷载下隧道周围土(常规土、冻融软土和加固软黏土)的动力特性。张曦等^[13]现场实测结果表明在上海

地铁荷载作用下,隧道周围饱和软黏土的响应频率存在高频和低频,高频范围为 2.4~2.6 Hz,低频范围为 0.4~0.6 Hz。表1是近几年来文献中模拟地铁振动荷载时试验条件。

为模拟地铁实际运营过程,本文探究联络通道周围土体在不同水泥掺入比下冻融水泥土动力学的变化规律,研究一定围压、循环应力比、动应力振幅、循环次数条件下,不同水泥掺入比、不同振动频率等因素对冻融水泥土应力—应变关系、动模量、

阻尼比变化规律的影响,通过查阅大量研究文献,并结合实际工况条件,制定了具体的试验参数。一般隧道埋深为 15 m 左右,考虑侧压力系数后,取试验围压为 200 kPa;根据前人实测频率结果结合试验室 GDS 动三轴试验设备能力,取振动频率为 0.5~1.5 Hz;通过前期预试验发现仅振动初期对土体影响较大,故取最大振次为 6 000 次;结合地铁车辆对土体产生的附加应力,取动应力幅值为 20 kPa,循环应力比为 0.3。具体试验规划见表 2。

表 1 模拟地铁振动荷载时试验条件汇总

Table 1 Summary of test conditions when simulating vibration load of subway

文献	最大振动次数	加载方式	加载频率/Hz	循环应力比	动应力幅值
[14]	2 000	以正弦波施加	2.5	—	初始 10,阶段增加 5
[15]	5 000	以正弦波施加	0.5、1.5、2.5	0.1~0.3	20、30、40
[16]	5 000	以正弦波施加	0.4~2.6	0.1~0.4	—
[17]	5 000	以正弦波施加	0.5、1.5、2.5	—	10、15、20
[18]	6 000	以正弦波施加	0.5、1.5、2.5	0.125~0.375	10、20、30
[19]	5 000	循环荷载以半波峰幅值施加	0.5、1.5、2.5	—	20、30、40

表 2 动三轴试验规划

Table 2 Dynamic triaxial test plan

水泥含量/%	振动频率	围压	振动次数	循环应力比	动应力幅值
0	0.5、1.0、1.5				
3	0.5、1.0、1.5				
5	0.5、1.0、1.5	200	6 000	0.3	20
5(冻融前)	0.5、1.0、1.5				
10	0.5、1.0、1.5				

1.2 试验方法

试验所用土取自宁波典型软黏土地层,地貌类型基本为滨海相淤泥积平原,在埋深 5~20 m 的范围内主要是由全新统海积淤泥质黏土组成,随深度的增加土层可以分为 4 层,现取②₂淤泥质黏土为研究对象,其基本物理属性见表 3。考虑试验应能满足重复性、再现性,采用重塑土制样,同时为了保证土质的均匀性。

将土烘干敲碎后充分拌合、混合,作为试验用土。为了检验试验土质均匀性,分别对土堆的不同位置多次随机抽取进行颗分试验,其颗粒级配测试结果如图 1 所示。由图 1 可见土颗粒级配曲线基本处于一个狭窄条带内,颗粒级配差异很小,因此可

表 3 宁波软粘土基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of the soft clay in Ningbo

土层编号	土层名称	天然含水量 ω /%	密度/ ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土粒比重 G_s	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p
② ₂	淤泥质黏土	43.74	1.79	2.69	49	20	29

以认为试验取土土质具有较好的一致性。

试验采用英国 GDS 公司生产的伺服电机控制的动三轴试验系统(DYNTTS),可进行强震测试、

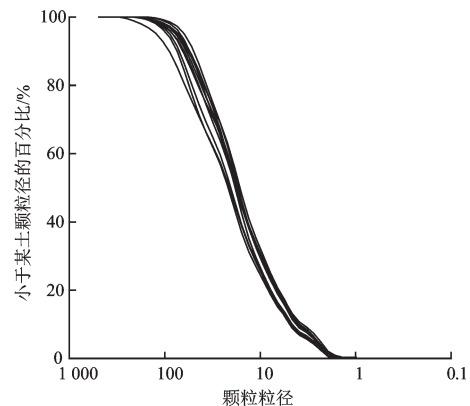


图 1 多次取样的级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of the soil under multiple sampling

动强度、动态模量、阻尼比等土体动态指标测试,位移精度为 $35 \mu\text{m}/50 \text{mm}$,位移分辨率为 $0.208 \mu\text{m}$,轴向力精度 \leq 荷重传感器量程的 0.1% ,轴向力分辨率为 16bit ,每个周期可以控制的数据点数为 $10\,000@1 \text{Hz}$, $2\,000@5 \text{Hz}$,最大可以存储的数据点数为 $1\,000$ 点/周期。GDS 动三轴试验系统主要由伺服主机系统及压力室,水压伺服控制加载系统,模拟信号与数字信号控制及转换系统及计算机控制系统四部分组成。

在固结不排水条件下(CU)进行应力控制式循环加载三轴试验,试验温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。选用正弦波加载方式。在不排水条件下进行循环加载三轴试验,为分析土体各参数指标的动态变化,试验终止条件为振动次数达到 $6\,000$ 次。从而获得不同试验条件下的土的动应力—应变关系、动模量、阻尼比的变化规律。试验采取干法制样,将土样与 C35 硅酸盐水泥充分混合,分 4 次加入三瓣模中,制成直径为 38cm 、高为 76cm 的三轴试验试样,制样过程要求制定相同的程序并由固定人员制备,沿高度分四层击实,严格控制每层质量保证各部分密度一致,每层之间进行必要的凿毛处治,防止试样分层。为了饱和后重塑试样能够自立成型,同时最大程度接近原状取样时土的初始孔隙比,所有制样干密度为 $1.23 \text{g}/\text{cm}^3$ (原状土干密度范围为 $1.1 \sim 1.25 \text{g}/\text{cm}^3$)。制样完成后,将试样放置于真空饱和缸内进行抽气饱和。为了在不排水条件下进行单调剪切试验时饱和土体孔隙水压力测量的精确性,需要充分饱和试样及减小孔压传递的滞后性。充分饱和后养护冻融,采用不同的水泥掺入比 α_w ,由于模拟水泥预注浆过程中加固体的水泥掺入量,水泥掺入较低,按 0% , 3% , 5% , 10% 掺加水泥。将水泥土放入温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,湿度为 95% 的养护箱中养护 7d 。养护完成后放入环境箱中,在 -15°C 环境箱冻结 48h 后在 18°C 室温下融化。为了检验重塑制样的质量,保证试验结果的可重复性,试验前开展试样平行性检验。随机抽取了 5 个制备的试样开展初始有效围压为 100kPa 的等压固结不排水剪切试验,结果如图 2 所示。由图 2 可知,5 组试验的应力—应变关系曲线以及超孔压—应变关系曲线发展规律一致,各曲线呈现出良好的重现性,最大差异不超过 4% 。表明本试验所用的重塑法制备的试样具有较好平行性。

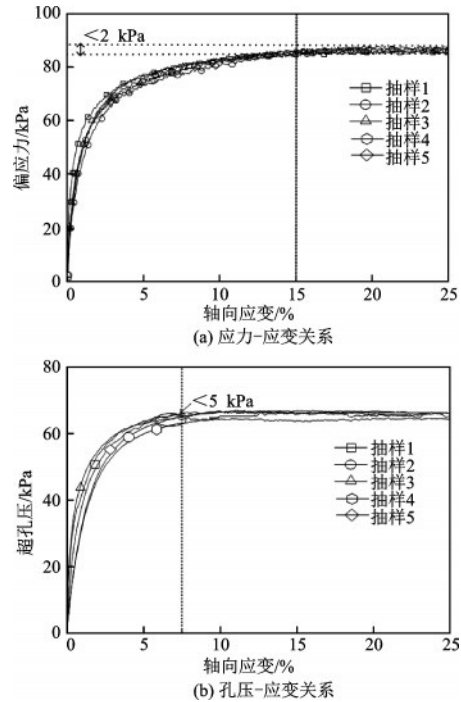


图 2 不排水剪切试验结果的可重复性

Fig.2 Repeatability of the results of undrained shear tests

2 试验结果与分析

2.1 不同因素对动应力—应变的影响

图 3 给出了第 1、10、100、1 000、3 000、6 000 次循环共计 24 组振动循环的动应力—应变曲线,由于不同水泥含量在不同振动频率下的应力—应变发展规律趋势基本相同,故取 0% , 5% , 10% 水泥含量试样,在振动频率为 1.5Hz 时进行应力—应变关系分析。由图 3 可以发现, 0% 水泥掺量试样冻融后应力—应变发展是非线性的,土样的塑性变形和黏性滞后造成加载和卸载曲线不重合,且能吸收较大的能量,其中一部分进行能量转化,另外一部分以不可逆塑性变形的形式储存在试样中,造成试样内部塑性损伤,损伤积累越大、试样越容易破坏。当振动次数增加时,滞回圈逐渐向右移动,产生塑性应变累积变形,变形越来越大、滞回圈逐渐变宽。

0% 水泥掺量试样在荷载循环初期,滞回圈的形状变化较大,1 000 个循环后,滞回圈的形状基本保持稳定, 5% 和 10% 水泥掺量试样的滞回圈近似于柳叶型,而不是椭圆型。最大应变出现在每个循环开始卸载一段时间后,说明试样从加载到卸载的反转处出现了较大的应变滞后,黏滞性较大,对比

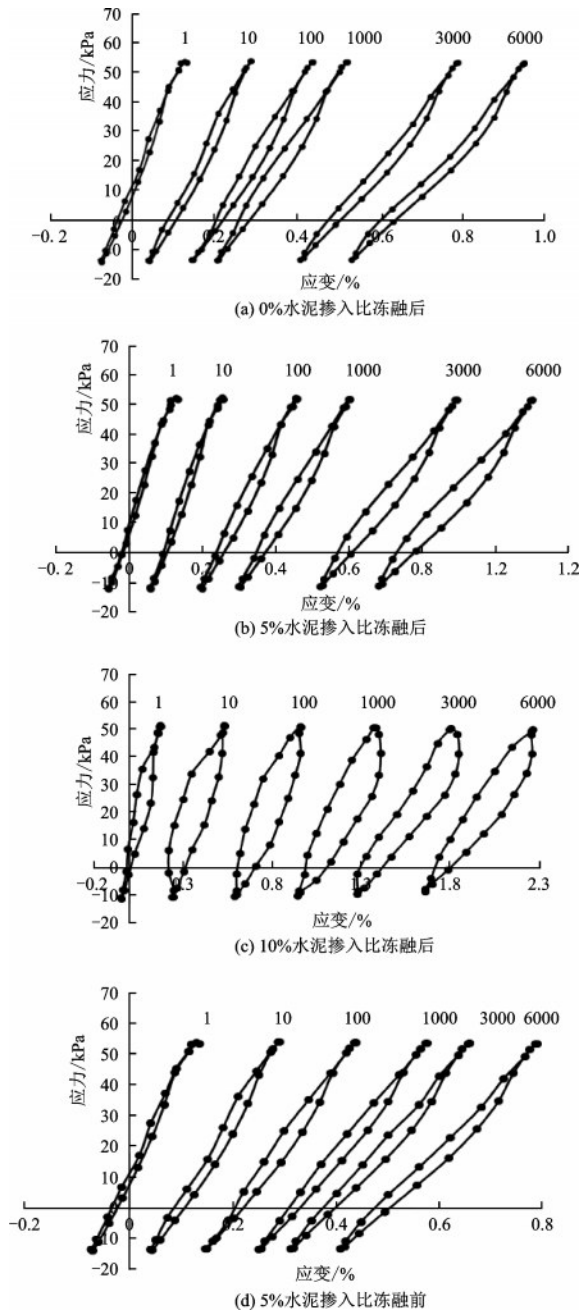


图3 不同水泥掺入比水泥土冻融前后应力-应变关系
Fig.3 Stress-strain relationship before and after freeze-thaw cycles with different cement mixing ratios

图3(a)、(b)和(c)可以看出,加入水泥后上述现象明显,此后的荷载循环中,滞回圈在荷载反转处呈尖叶状,表明荷载反转处应变滞后不明显。在加载初期,每一个荷载循环下的加载段和卸载段非线性特征明显,且都存在应变滞后于应力的现象。在所有循环荷载施加过程中,塑性变形一直存在,只不过经历着从大→小→略微变大的变化过程。水泥掺量影响滞回圈的开口形状及滞回圈的宽度。在相同循环次数下,水泥掺量越大,滞回圈的宽度增

量越小、滞回圈的面积增量越小。这主要是因为掺入水泥,加固了土骨架,当水泥掺入量越大,每个循环的能量耗散越小,内部的损伤累积也越小,表现为稳定型;而水泥掺量较低时,每个循环的能量耗散较大,试样内部的损伤累积也大,表现为破坏型。

图3(d)反映了冻融前5%水泥掺入比试样,在振动频率为1.5 Hz下的应力-应变关系,发展趋势几乎一致,但冻融前后的应力-应变关系有一定差异,冻融前试样的应变范围较冻融后相差6%,原因在于,土中掺入水泥后,水泥水化时产生大量的针状、纤维状晶体,这些晶体相互交错,形成三维网格,使水泥土具有一定的结构性,水泥土冻结时由于土中水相变成冰后体积增大,对三维晶体网格产生张拉效应,使水泥水化晶体部分断裂,引起三维晶体网格的部分损伤,扰动了水泥土原有的结构,致使水泥土强度降低,由于是一次冻融,其作用有限。

滞回圈面积反应了能量耗散的大小,如图4所示,当水泥掺入比为0%、5%(冻融前)、5%、10%时,从第1振次至6000振次,其滞回圈面积分别增长200%、157%、150%、100%,且随着振次的增加,其面积的增长率呈现先快后慢的趋势。其中5%(冻融前)与5%相比,其面积差值为7%,也反映了一次冻融过程改变了土体内部的力学特性,冻融后土体强度有所降低,但降低幅度不大。

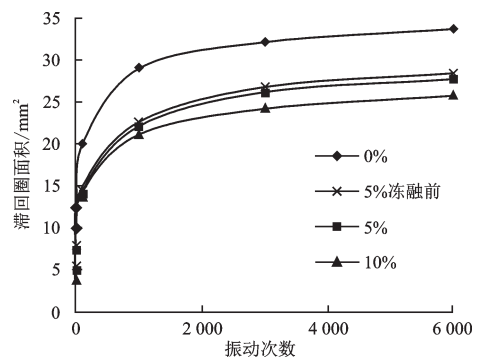


图4 不同水泥掺入比滞回圈面积与振动次数关系
Fig.4 Curves of the relationship between the area of concrete with different hysteresis loops and the number of vibrations

从滞回圈的形态特征可知,每个循环的耗散能由塑性变形耗散能和黏弹性变形耗散能两部分组成,这两部分能量在循环过程中的变化特征是不同的,塑性变形耗散能与每个循环产生的塑性应变相对应,塑性应变越大,塑性变形耗散能越大;当塑性

变形很小、滞回圈近似闭合时,滞回圈面积也基本相同。由于水泥土改良后软土试样在加卸载过程中的变形既有弹性变形,也有黏弹性变形和塑性变形,且循环过程中塑性变形耗散能和黏弹性变形耗散能的变化特征不同,加之变形过程中塑性应变的累积,从而造成加载和卸载曲线不同,使加入与不加入水泥试样在循环荷载下的滞回圈表现出疏密、闭合程度以及形态的不同特征。

图5反映了在6000次振动次数下,不同频次,不同水泥掺入比下累积应变的发展情况,振动频率越大,其累计塑性应变也越大。随着水泥掺入量不断增加,其累计塑性应变呈指数递减,这是因为,随着水泥含量的增大,试样的强度逐渐变大,强度增长速率先快后慢。

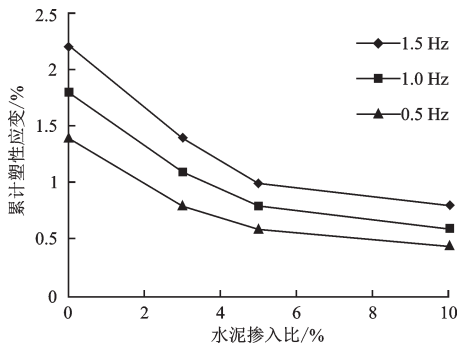


图5 6000振次下不同频次水泥掺入比与累积应变关系曲线

Fig. 5 Curves of cement mixing ratio and cumulative strain at different frequencies under 6000 vibrations

2.2 不同因素对水泥土动弹性模量的影响

(1) 振动次数对动弹性模量的影响

图6为不同水泥掺入比试样动弹性模量随振动次数的变化。由图6可见,振动频率分别为0.5、1.0和1.5 Hz时,动弹模对应进入稳定阶段的振次分别为4000、2000和1000次,此后基本保持不变,可见地铁长期荷载作用下动弹模的变化发生在前4000振次。说明地铁长期荷载下,软土水泥土冻融后动弹模变化主要发生在前4000振次。相同水泥掺入比和振动频率下,随振动次数的增加,动弹性模量逐渐降低,土体软化程度提高。在循环荷载初期,动弹模衰减速率快,随着循环次数的增加,动弹模衰减速率降低,最终表现为收敛趋势。其衰减规律

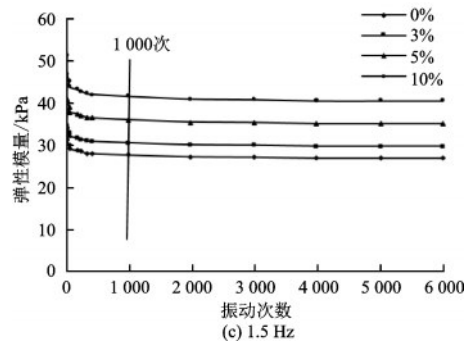
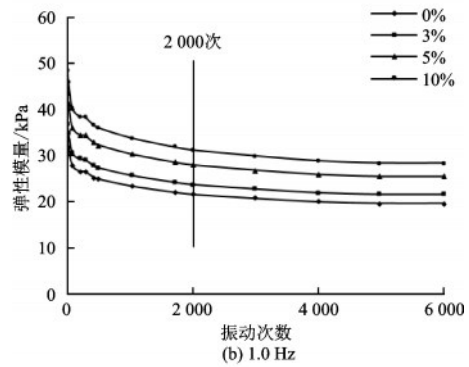
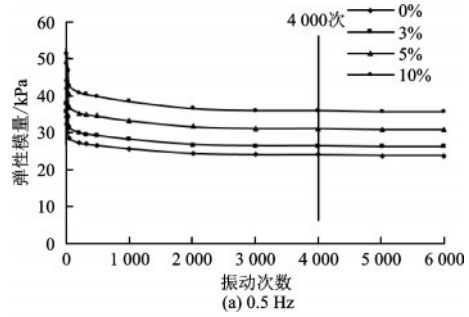


图6 不同水泥掺入比动弹模随振次发展曲线

Fig. 6 Curves of the development of specific cement with different cement mixing ratios

基本一致,都可以分为急剧衰减阶段和缓慢衰减阶段。以振动频率0.5 Hz、3%水泥掺入量的动弹模随振次发展曲线分析,其符合对数变化规律: $E = -2.831 \ln(N) + 49.659$,相关系数 $R = 0.995$ 。

(2) 水泥掺入比对动弹性模量的影响

图7为振动频率0.5 Hz,动弹性模量随水泥掺入比变化曲线。由图可知,在相同振动频率下,动弹性模量随水泥掺入比的增大而线性增大,但其增加速率随循环次数的增加而减小, N 为10次时水泥掺入比每增加1%,动弹模增加1.7 kPa, N 为6000次时水泥掺入比每增加1%,动弹模增大0.4 kPa,说明振动初期能量消耗较大,振动后期能量消耗趋于稳定。选取6000振次基本可反映试样在动三轴试验中的各项指标变化。各条件下回归公式见表4。

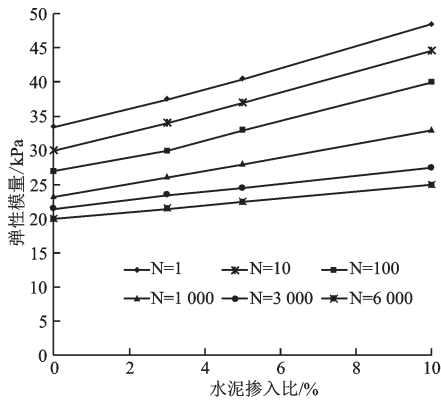


图7 频率0.5 Hz时水泥掺入比对动弹性模量的影响
Fig.7 Effect of cement mixing ratio on dynamic elastic modulus at 0.5 Hz

表4 不同振下水泥掺入比与动弹性模量回归公式
Table 4 Regression formulas of cement mixing ratio and dynamic elastic modulus under different vibrations

振动次数	回归公式	相关性
10	$E_d = 1.5148\lambda + 33.179$	0.998
100	$E_d = 1.3208\lambda + 26.557$	0.994
1 000	$E_d = 0.9721\lambda + 23.228$	0.999
6 000	$E_d = 0.5001\lambda + 19.999$	1

(3) 振动频率对动弹性模量的影响

图8为不同水泥掺入比下振动频率与稳定动弹性模量之间的关系,图9为3%水泥掺入比时,不同振动次数下,振动频率与动弹性模量之间的关系。由图可知,当水泥掺入比相同时,振动频率越高,试样弹性模量越大,且符合线性增大的变化规律。由图8可以发现,随着振动次数的增加,动弹性模量增长进入稳定阶段,增长量逐渐降低,3 000~6 000 振次阶段的增长速率几乎一致。

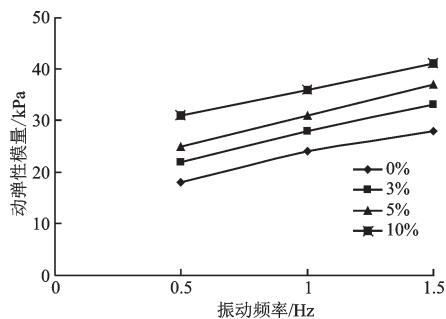


图8 不同水泥掺入比振动频率与稳定动弹性模量关系
Fig.8 Relationship between vibration frequency and stable dynamic elastic modulus

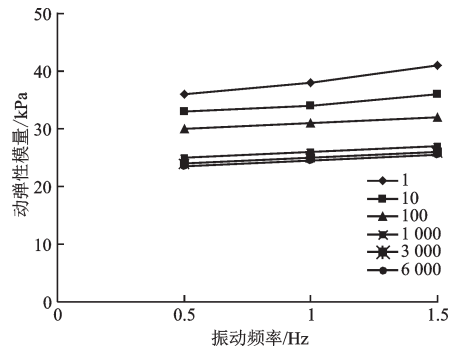


图9 3%水泥掺入比下振动频率对动弹性模量的影响
Fig.9 Effect of vibration frequency on dynamic elastic modulus at 3% cement mixing ratio

2.3 不同因素对水泥土阻尼比的影响

土的阻尼比是由土体变形时内摩擦作用消耗能量造成的,反映了在循环荷载作用下,动应力—应变关系的滞后性,即动荷载作用下能量因内部阻力而损失的特性。

(1) 振动次数对阻尼比的影响

图10为不同水泥掺入比的冻融水泥土动阻尼比随循环次数变化曲线。由图可知,阻尼比随振动次数的增加而增长,呈“蠕变”曲线,可分为衰减型和非衰减型,总体分成两个阶段:前1 000 振次为阻尼比快速增长阶段,阻尼比增长率随振动次数的增加而呈下降趋势;1 000~6 000 振次,阻尼比的增长率逐渐减缓,并趋于线性发展,且随水泥掺入比的增加,曲线愈加平缓,即增长速率更小。当水泥掺入比相同时,振动频率越高,动阻尼比越小,阻尼比随振动次数增加而升高的幅度也越小,可近似用对数曲线进行拟合,说明地铁长期荷载下,软土水泥土冻融后动阻尼比变化主要发生在前1 000 振次。

(2) 水泥掺入比对动阻尼比的影响

振动频率为0.5 Hz的动阻尼比随水泥掺入比变化曲线如图11所示。由图可知,在相同振动频率下,动阻尼比随水泥掺入比的增大而减小,且水泥掺入比越大,动阻尼受循环次数影响越小,并呈近似双曲线型减小。循环次数从10 增至6 000 时,动阻尼比增加幅度越来越小水泥掺入比,为0%、3%、5%、10% 试样动阻尼比分别增加55.1%、37.5%、27.1%、26.5%,说明冻融软土与冻融水泥土相比,水泥掺入减少了土体在动荷载下的能量耗散,增强了土体强度。其中,当水泥掺入比大于5%后,土体的动阻尼比变化受振动次数的影响大大减小。这

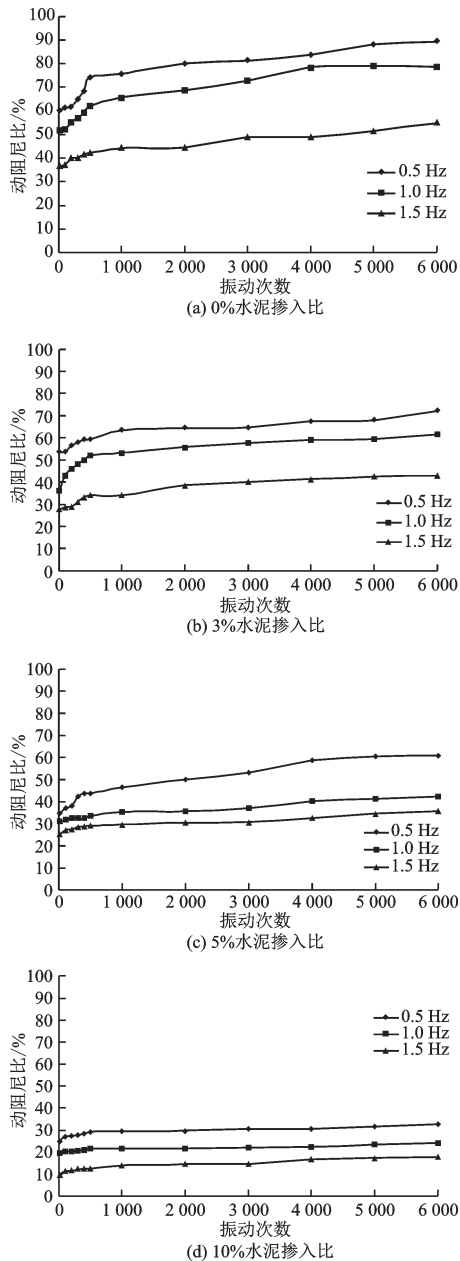


图10 不同振动频率动弹模随振次发展曲线

Fig.10 Evolution curve of dynamic modulus of vibration under different frequencies

也验证了当水泥掺入比 $\leq 5\%$ 时,地铁长期振动荷载的影响较大,因此工程中应确保水泥掺入比 $> 5\%$,以确保地铁长期振动荷载作用下隧道及连通道的稳定性。

(3)频率对动阻尼比的影响

由图12可知,当水泥掺入比相同时,振动频率越高,试样阻尼比越小,且符合线性减小的变化规律,随着水泥掺入量从0~10%增加,其阻尼比最大减小了55%。由图13可以直观地发现,0.5~1.0 Hz阶段,动阻尼的增长速率随着振动次数的增加逐渐

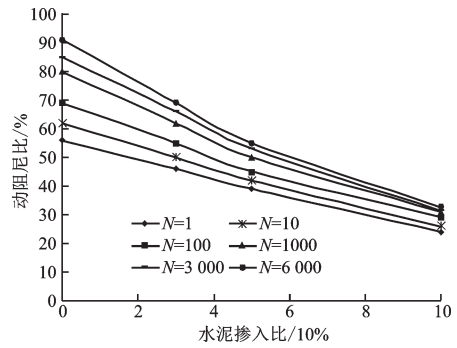


图11 振动频率为0.5 Hz水泥掺入比对动阻尼比的影响

Fig.11 Effect of cement mixing ratio on dynamic damping ratio with 0.5 Hz vibration frequency

增大;1.0~1.5 Hz阶段,动阻尼比的增长速率逐渐降低,且随着振动次数的增加,动阻尼比增长进入稳定阶段,增长量逐渐降低,3 000~6 000振次阶段的的增长量几乎一致,说明较大振动频率时,绝大部分的阻尼比变化开始于振动的初始阶段。以3 000振次为临界值,之后增长量几乎为零,该临界值与图8所示振动频率与动弹性模量关系相同。

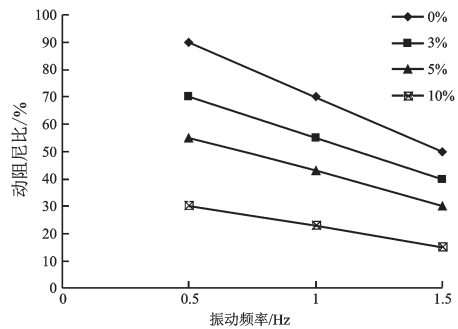


图12 振动频率与稳定阻尼比关系

Fig.12 Relationship between vibration frequency and stable damping ratio

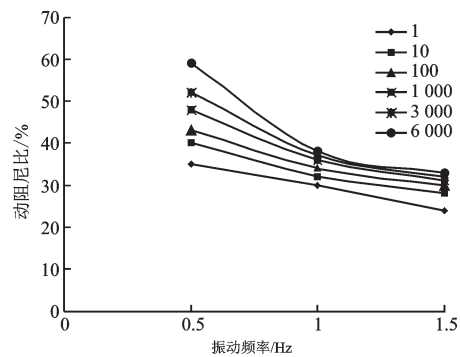


图13 3%水泥掺入比下振动频率对阻尼比的影响

Fig.13 Effect of vibration frequency on damping ratio at 3% cement mixing ratio

3 结 论

(1)水泥掺入比越大,滞回圈面积越小,说明每个荷载循环中的能量耗散越小,试样内部的损伤累积越小,试样强度越高;随着水泥掺入比从0%增至10%时,从第1振次至6 000振次,其滞回圈面积分别增长200%、150%、100%,呈现先快后慢发展的趋势。其累积塑性应变最大减小50%,试样一次冻融前后相比,其强度减小6%左右。

(2)在相同振动频率下,动弹性模量随水泥掺入比的增大而线性增大,且增加速率随循环次数的增加而减小,大于5%水泥掺入比后的变化规律几乎一致。当水泥掺入比相同时,动弹模随振动频率线性增大。振动初始阶段,水泥掺入比每增加1%,动弹模量增加1.5 kPa,振动次数在3 000~6 000振次阶段的的增长速率几乎一致,水泥掺入比每增加1%,动弹模量增加0.5 kPa,其模量最大增加45%,振动初期能量消耗较大,后期能量消耗趋于稳定,最终表现为收敛趋势。

(3)在一定水泥掺入比下,振动频率越高,动阻尼比越小,动阻尼比随振动次数增加而升高的幅度越小,以3 000振次为临界值,之后增长量几乎为零,说明绝大部分的动阻尼比变化开始于振动的初始阶段。在相同振动频率下,动阻尼比随水泥掺入比的增大而减小,且水泥掺入比越大,动阻尼受循环次数影响越小,大于5%水泥掺入比后的变化规律几乎一致。随着水泥掺量和振动频率的增加,其最大阻尼比变化可达55%,变化曲线型似“蠕变”曲线,可分为衰减型和非衰减型。

(4)地铁长期荷载下,软土水泥土冻融后动弹模、动阻尼比变化主要分别发生在前4 000振次与1 000振次,后期作用对软土水泥土加固冻融后的动力学特性影响很小,工程中可以不予考虑。工程中联络通道周围产生非均质冻融水泥土水泥参量应大于5%,可确保地铁长期荷载下地基的稳定性。

参考文献:

- [1] Yu L L, Xu X Y, Ma C. Combination effect of seasonal freezing and artificial freezing on frost heave of silty clay [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(1): 163-168.
- [2] 王 军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5):

1 407-1 412.

Wang J, Ding G Y, Pan L Y, et al. Study of mechanics behavior and constitutive model of cemented soil under static triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1 407-1 412. (in Chinese)

- [3] 鲍俊安, 杨 平, 张翔宇. 水泥土融沉特性的试验研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 97-102.

Bao J A, Yang P, Zhang X Y. Experimental study on thaw subsidence properties of cement-improved soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(5): 97-102. (in Chinese)

- [4] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198.

Wang T L, Liu J K, Tian Y H. Static properties of cement and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198. (in Chinese)

- [5] Mardani-Aghabaglou A, Kalipcilar I, Sezer G I, et al. Freeze-thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack [J]. Applied Clay Science, 2015, 115: 179-188.

- [6] 侯永峰, 张 航, 周 建, 等. 循环荷载作用下水泥复合土变形性状试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 288-291.

Hou Y F, Zhang H, Zhou J, et al. Study on the strain of composite cement soil under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 288-291. (in Chinese)

- [7] Cai Y Q, Liang X. Dynamic properties of composite cemented clay [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(3): 309-316.

- [8] Sharma S S, Fahey M. Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(7): 619-629.

- [9] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 156-1 160.

Yang G Q. Study of dynamic performance of cement-improved soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 156-1 160. (in Chinese)

- [10] 王 军, 郑 晓, 蔡袁强, 等. 应变控制下水泥土动静力特性试验 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1 857-1 862.

Wang J, Zheng X, Cai Y Q, et al. Experimental research on static and dynamic characteristics of cement soil under strain control [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1 857-

- 1 862. (in Chinese)
- [11] Eskisar T, Altun S, Kalipcilar I. Assessment of strength development and freeze-thaw performance of cement treated clays at different water contents [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 111: 50-59.
- [12] Liu J K, Wang T L, Tian Y H. Experimental study of the dynamic properties of cement and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 29-33.
- [13] 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, 40(2): 85-88.
Zhang X, Tang Y Q, Zhou N Q, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (2): 85-88. (in Chinese)
- [14] Ren X W, Tang Y Q, Xu Y Q, et al. Study on dynamic response of saturated soft clay under the subway vibration loading: instantaneous dynamic response [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64 (7): 1 875-1 883.
- [15] 徐毅青, 唐益群, 任兴伟, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围加固软黏土动弹性模量试验 [J]. 工程力学, 2012, 29(7): 250-255, 269.
Xu Y Q, Tang Y Q, Ren X W, et al. Experimental study on dynamic elastic modulus of reinforced soft clay around subway tunnel under vibration loading [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 250-255, 269. (in Chinese)
- [16] Yan C L, Tang Y Q, Wang Y D, et al. Accumulated deformation characteristics of silty soil under the subway loading in Shanghai [J]. Natural Hazards, 2012, 62 (2): 375-384.
- [17] Tang Y Q, 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): 771-787.
- [18] Cui Z D, Zhang Z L. Comparison of dynamic characteristics of the silty clay before and after freezing and thawing under the subway vibration loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 29-36.
- [19] 唐益群, 赵化, 王元东, 等. 地铁荷载下隧道周围加固软黏土应变累积特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 972-977.
Tang Y Q, Zhao H, Wang Y D, et al. Characteristics of strain accumulation of reinforced soft clay around tunnel under subway vibration loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39 (7): 972-977. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)



(上接第 817 页)

- [16] 杜立平, 王新岐. 土壤固化剂固化石灰土在盐渍化软土地区路基的应用研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2013 (8): 307-309.
Du L P, Wang X Q. Study on the application of soil curing agent to solidify lime soil in salinized soft soil area [J]. Urban Road Bridges and Flood Control, 2013(8): 307-309. (in Chinese)
- [17] 周洛汉, 冉航源. 淤泥质软土水泥固化特性室内试验研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(5): 14-15.
Zhou M H, Ran H Y. A dissertation on laboratory test study on the characteristics of cement solidified silt soft soil [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2017, 40(5): 14-15. (in Chinese)
- [18] Hosseinpour I, Almeida M S S, Riccio M. Strength and compressibility characteristics of a soft clay subjected to ground treatment [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(3): 1 051-1 066.
- [19] Kouby A L, Guimond-Barrett A, Reiffsteck P, et al. Influence of drying on the stiffness and strength of cement-stabilized soils [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2017(1): 1-12.
- [20] 圆锥动力触探试验规程: YS/T 5219—2019 [S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2019.
Specification for dynamic penetration test: YS/T 5219—2019 [S]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association, 2019. (in Chinese)
- [21] 铁路工程地质原位测试规程: TB 10018—2018 [S]. 北京: 国家铁路局, 2018.
Code for in-situ testing of railway engineering geology: TB 10018—2018 [S]. Beijing: National Railway Administration of P.R. China, 2018. (in Chinese)
- [22] 艾志伟, 罗嗣海, 曾勇, 等. 水泥土强度室内外试验对比研究 [J]. 江西理工大学学报, 2013, 34(3): 47-53.
Ai Zh W, Luo S H, Zeng Y, et al. Comparative study of cement-soil strength in the indoor and outdoor experiments [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2013, 34(3): 47-53. (in Chinese)