

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0102

ZHANG Xiangdong, REN Kun, LIU Jiashun. Experimental study on dynamic parameters of aeolian sand in western Liaoning Province under different freezing conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1229-1237. [张向东, 任昆, 刘家顺. 不同冻结条件下辽西风积砂土动力参数试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1229-1237.]

不同冻结条件下辽西风积砂土动力参数试验研究

张向东¹, 任 昆², 刘家顺¹

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连交通大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 为研究不同冻结条件对辽西风积砂土动力参数的影响, 以京沈客运专线阜新段路基为研究背景, 利用 GDS 冻土动态三轴测试系统对不同温度、水分、冻融次数下风积砂土的动弹性模量及阻尼比进行了测试, 获得了土体动弹性模量及阻尼比的变化规律, 提出了风积砂土动力参数的修正系数。结果表明: 随着环境温度的降低, 土体动弹性模量逐渐增大, 阻尼比逐渐减小, 温度与动弹性模量之间近似呈线性关系, 与阻尼比呈指数关系; 随着含水率的增加, 土体动弹性模量逐渐增大。存在着一个含水率敏感区间, 在此区间内动弹性模量变化较为明显, 含水率与阻尼比之间关系不明显, 随着含水率的增加阻尼比稍有降低; 随着冻融循环次数的增加动弹性模量逐渐降低, 阻尼比逐渐增大, 前 5 次冻融循环对土体动力参数的影响较大, 之后影响逐渐减小。在此基础上, 建立了风积砂土动力参数的修正系数, 能够较好的反映不同冻结条件下土体动力参数的变化规律, 为季冻区铁道工程建设提供参考。

关键词: 动弹性模量; 阻尼比; 温度; 含水率; 冻融循环; 修正系数

中图分类号: U416; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1229-09

0 引言

京沈客运专线阜新段位于辽宁西北部, 属于季节冻土区。与常温土相比, 季节冻土的动力学性能随季节的改变会出现较大的变动, 对上部的铁道工程结构会造成较大的影响。因此, 研究不同温度、水分条件下土体的动力参数变化对季节冻土区铁路工程建设有重要的意义。

对于冻土的工程性质, 大量学者进行了研究。何菲等^[1]对不同冻结温度、围压及频率下, 青藏铁路沿线冻结砂土的动力参数进行了试验研究。于啸波等^[2]研究了负温对粉土动特性模量及阻尼比的影响, 结果表明负温对初始模量及剪切模量比的影响显著, 且 0 ~ -4 °C 对土体的影响最为显著。王静等^[3-4]研究了冻融循环对路基填土的影响, 发现随着冻融循环次数的增加, 土体动、静弹性模量均有

不同程度的衰减, 动、静弹性模量有较好的相关性。罗飞等^[5]研究了温度、围压对冻土阻尼比的影响, 获得了阻尼比的温度敏感区间。严晗等^[6]研究了冻融循环对粉砂土动弹性模量及阻尼比的影响, 结果表明冻融循环对粉砂土动弹性模量及阻尼比的影响较大, 但经过多次循环后影响基本趋于稳定。Vinson^[7]对不同围压及不同含水率下土体的阻尼比进行了研究, 发现阻尼比随含水率和围压的变化不明显。Czajkowski 等^[8]对冻土的阻尼比进行了研究, 结果表明冻土的阻尼比不受频率的影响。Xie 等^[9]、罗飞等^[10]、刘雨彤等^[11]、王强等^[12]研究了冻融循环对土体物理力学性质的影响。

由于土形成的过程十分复杂, 使得其具有极强的区域性, 不同类型的土其工程性质有较大区别。再加之不同的冻结过程对土体造成的影响, 会造成冻土有较大的性能差异, 且大多数研究都偏向于结

收稿日期: 2018-06-13; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774166); 辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-271); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180550293)资助

作者简介: 张向东(1962-), 男, 吉林榆树人, 教授, 1997年在东北大学获博士学位, 从事岩土工程教学与科研工作。

E-mail: jwd101@126.com

通信作者: 任昆, 讲师, 从事环境岩土工程研究. E-mail: 568610013@qq.com.

构抗震方向,对于列车循环荷载下路基土体的动力参数研究较为缺乏。为研究不同冻结条件的辽西风积砂土在列车循环荷载作用下的动力参数,本文利用英国 GDS 冻土动态三轴测试系统对不同温度、水分以及冻融循环次数条件下,土体的动力参数进行了研究。根据滞回曲线的形态提出了一种阻尼比的优化计算方法,给出了动弹性模量及阻尼比在不同温度及水分条件下的修正系数,建立了动弹性模量及阻尼比与冻融次数的关系。

1 试验方法

1.1 试验原料及试件制作

本试验中使用的风积砂土取自京沈客专沿线,根据《铁路路基设计规范》^[13]中对土类别的划分,所选用的风积砂土属于级配不良的细砂,其基本物理性质见表 1,级配曲线如图 1 所示。

表 1 砂土的物理性质

Table 1 Physical properties of the aeolian sand

名称	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
风积砂土	2.73	15.82	8.69	7.13

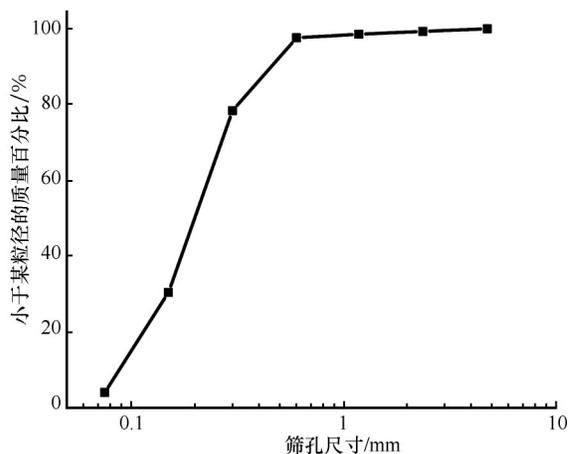


图 1 积砂的级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the aeolian sand

将风积砂土分别在 5%、7%、9% 及 11% 的含水率下搅拌均匀,在三瓣饱和器中分 5 层振捣压实,制成 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的试件。试件制作完成后立即用保鲜膜将试件包裹并用胶带封口放入冷柜中,防止冻结过程中水分的散失,之后进行土样在冻结状态下的动力参数测定。

1.2 试验过程

试验利用英国 GDS 冻土动态三轴试验系统开展(图 2),该设备由温控系统、荷载施加系统及微

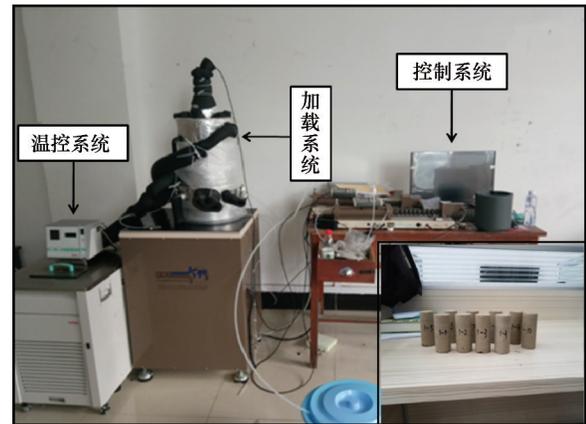


图 2 GDS 冻土动态三轴试验系统

Fig. 2 Photo showing the GDS dynamic triaxial test system

机控制系统组成,温度调节范围为 $20 \sim -40 \text{ }^\circ\text{C}$,围压范围为 $0 \sim 2 \text{ MPa}$,最大轴向荷载 25 kN ,最大轴向位移 90 mm ,荷载频率为 $0.1 \sim 5 \text{ Hz}$,可以满足中低围压、高振次、多种频幅的试验要求。

根据对已有研究成果的总结^[14],本试验将冻结温度 T 、含水率 ω 和冻融次数 N 作为影响季节冻土性质的主要因素进行研究,冻结时间为 12 h ,融化温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,时间为 12 h 。为模拟列车荷载作用下土体动力学特性的改变,考虑列车荷载作用时间短暂,试验采用固结不排水的试验方法(CU 试验)进行。根据文献[15-16]中对列车荷载的研究,确定试验加载幅值为 50 kPa (半幅),加载形式为正弦波,围压为 100 kPa ,加载频率为 3 Hz ,试验的其他控制条件见表 2。试验终止的条件为每小时变形小于 0.1 mm 或累积塑性应变超过 5% 。前者认为变形已趋于稳定,后者认为试件已发生破坏。

表 2 冻结风积砂土的试验控制条件

Table 2 Control conditions for experimenting the frozen aeolian sand

组号	温度 $T/^\circ\text{C}$	含水率 $\omega/\%$	冻融次数 $N/\text{次}$
1	-1、-3、-5、-10	5、7、9、11	0
2	-1、-3、-5、-10	7	0、1、3、5、7、10
3	-5	5、7、9、11	0、1、3、5、7、10

1.3 动弹性模量及阻尼比的确定

若将土体看作为一种黏弹性材料,则其动力应力-应变曲线在一个荷载周期内将构成一个闭合的椭圆(图 3),其阻尼比 λ 确定的方法为:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{4\pi} \frac{A_0}{A_T} \quad (1)$$

式中: A_0 为滞回曲线 $ABCD$ 围成的椭圆面积,为土

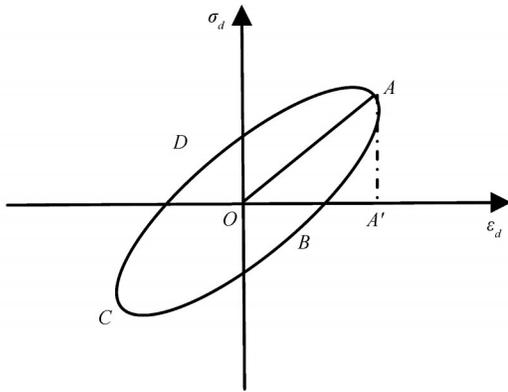


图3 理想黏弹性土的滞回曲线示意图

Fig. 3 Hysteretic curve of the perfect viscous elastic soil

体在荷载作用一个周期内所损耗的能量 ΔW ; A_T 为三角形 AOA' 的面积, 为在荷载作用一个周期内所贮存的总能量 W 。

然而风积砂土并不是理想的黏弹性体, 其滞回曲线大多不是闭合的椭圆(图4), 即使曲线闭合也不构成真椭圆^[17-18]。对于风积砂土的滞回曲线, 在计算其面积时常见的方法有两种: 一种为将试验所测得的试验点看作为理想椭圆, 进行拟合后再对面积进行求解; 另一种为将所测的试验点以直线相连接构成多个多边形, 再将这些多边形的面积进行求和, 以多边形面积之和代替滞回曲线椭圆的面积。

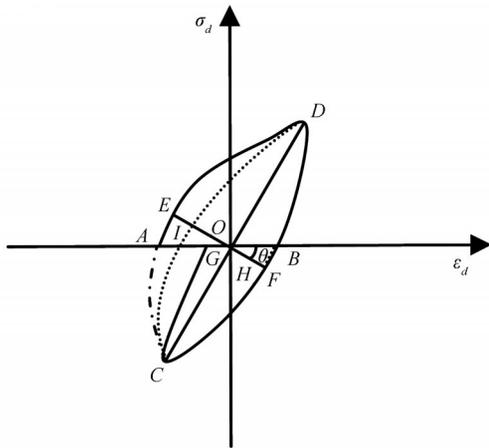


图4 风积砂土的滞回曲线示意图

Fig. 4 Hysteretic curve of the aeolian sand

对于这种不闭合的滞回曲线, 可以通过以下方法近似求得其所围成的面积。设滞回曲线与横轴的焦点为 A 、 B 、 G , 坐标原点为 O , AG 的中点为 I , 应力最大值与最小值对应的点为 C 、 D 。通过原点作与 CD 垂直的直线, 与滞回曲线的交点为 E 、 F , 直线 EF 与横轴的夹角为 θ , 过 B 作 OF 的垂线与 OF 的交点为 H 。

以椭圆面积法求解滞回曲线面积的难点主要在于椭圆短轴位置及长短的确定, 以往常用的方法是将滞回曲线近似看作椭圆曲线, 以 CD 作为长轴, EF 作为短轴, 其所围成的面积 A_E 可以按照椭圆面积公式进行计算, 即:

$$A_E = \pi \cdot |CD| \cdot |EF| \quad (2)$$

但由于滞回曲线的不闭合的性质, 导致 OE 的长度大于 OF , 使得所计算的面积比真正的滞回曲线围成的面积增大了面积 ACG 。

为减小上述计算方法带来的误差, 本文对椭圆面积的计算进行了修正, 当滞回曲线比较“直立”即 θ 较小时, 可以近似用直线 OH 来代替 OF , 椭圆短轴的长度可以用式(3)确定。

$$b = |BI| \cdot \cos\theta \quad (3)$$

当滞回曲线闭合时, A 、 I 、 G 三点重合 AG 的长度趋于 0, 短轴的长度为:

$$b = |AB| \cdot \cos\theta = |BI| \cos\theta \quad (4)$$

则滞回曲线所围成的面积 A_L 可以用椭圆 $IDBC$ 的面积来代替, 使得计算结果更加准确。

$$A_L = \pi \cdot |CD| \cdot |BI| \cdot \cos\theta \quad (5)$$

则动弹性模量及阻尼比可以由式(6)和式(7)分别进行计算。

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \quad (6)$$

$$\lambda' = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{\sqrt{(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})^2 + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_p/2) \cos\theta}{2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})} \quad (7)$$

式中: λ 按修正椭圆面积法求得的阻尼比; ε_{\max} 、 ε_{\min} 、 σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为荷载作用的一个周期内所对应的最大、最小应变及应力; ε_a 为卸载过程中应力为 0 时所对应的应变; ε_p 为一周期荷载作用后不能恢复的塑性变形。

图5为不同冻融循环次数下所测得的滞回曲线, 为验证阻尼比计算方法的准确性, 分别通过椭圆面积法、改进的椭圆面积法及多边形面积累加法对试验过程中的阻尼比进行计算, 计算结果如图6所示。

通过图6可以看出, 椭圆面积法所求得的阻尼比与改进的椭圆面积法、多边形面积累加法相比有所偏大。改进的椭圆面积法与多边形面积累加法所求得的阻尼比较为接近, 说明利用改进的椭圆面积法来进行阻尼比的计算具有一定的精度, 且与多边形面积累加法相比所需的数据点更少、计算过程更加简便。

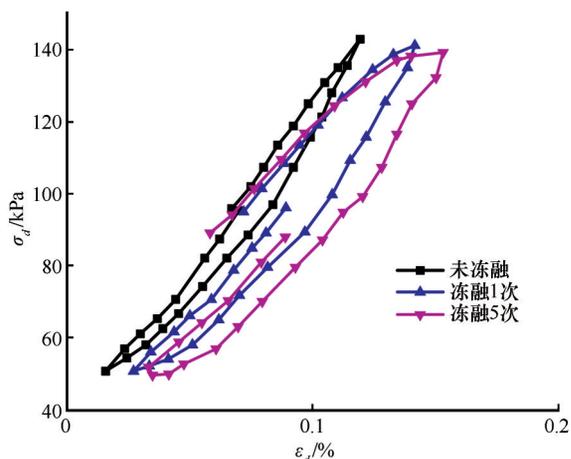


图5 风积砂土的滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of the aeolian sand after 0, 1 and 5 freeze-thaw cycles

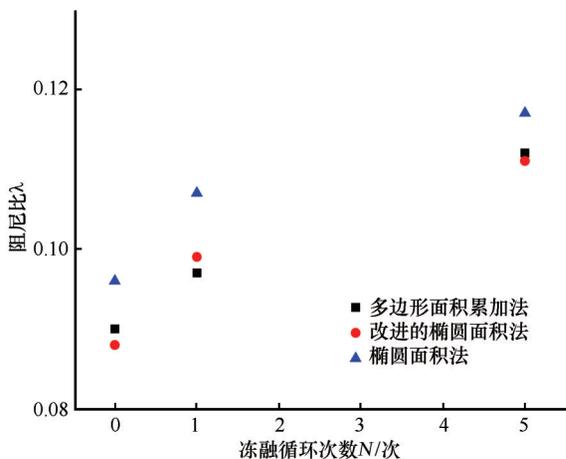


图6 阻尼比计算方法的比较

Fig. 6 Comparison of damping ratios calculated by polygonal area accumulation, improved elliptic area method and elliptic area method

2 试验结果及分析

2.1 温度对动弹性模量及阻尼比的影响

图7及图8给出了含水率为7%，经历不同冻融循环次数条件下风积砂土的动弹性模量及阻尼比与冻结温度的关系。

通过图7可以发现，在冻融循环次数一定的条件下，风积砂土的动弹性模量随着冻结温度的降低而逐渐增大，这是因为在含水率及冻融次数相同的条件下，外部环境的温度越低参与冻结水分的结晶作用就越强，土颗粒与冰晶之间的胶结作用越强，抵抗变形的能力越强，从而使土体表现出较大的刚度。当温度一定的条件下，土体的动弹性模量随着冻融循环次数的增加而逐渐降低，前5次循环对土

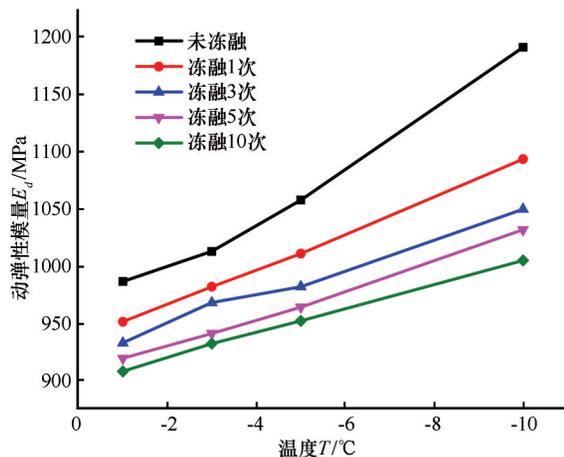


图7 动弹性模量与温度的关系

Fig. 7 Relationship between dynamic elastic modulus and temperature under various freeze-thaw cycles

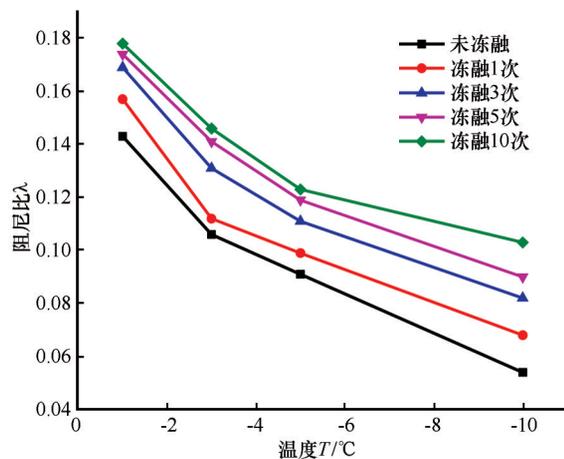


图8 阻尼比与温度的关系

Fig. 8 Relationship between damping ratio and temperature under various freeze-thaw cycles

体的动弹性模量的影响较大，这是由于土体孔隙中的自由水在冻结过程中发生体积膨胀，在膨胀力的作用下使土体内部发生细小裂缝。当冻结土体融化时，水分渗入裂缝中在下次冻结时继续对土体产生破坏。但由于得不到外界的水分补充以及水分的蒸发作用使得土体在经历数次冻融循环后性质基本趋于稳定。

通过图8可以看出，在冻融循环次数相同的情况下，土体的阻尼比随着温度的降低而逐渐减小，其变化规律与动弹性模量相反。这是因为随着冻结温度的降低，土中未冻结的水分逐渐减小，土体表现出较大的强度与刚度，对振动波能量的吸收能力减弱，表现出较小的阻尼比。在冻结温度相同时，阻尼比随着冻融循环次数的增加而逐渐增大，前5次冻融循环阻尼比的增大速率较高，之后阻尼

比的变化趋于稳定。这是因为随着冻融次数的增加土体内部出现的裂缝也在增加,使得土体对动力波能量的吸收能力增强,表现出阻尼比增大的趋势。但由于冻融循环对土体结构的破坏程度有限使得阻尼比在历经数次循环后基本趋于稳定。

2.2 水分对动弹性模量及阻尼比的影响

图9和图10为未经历冻融循环情况下,土体动弹性模量及阻尼比与含水率之间的关系。

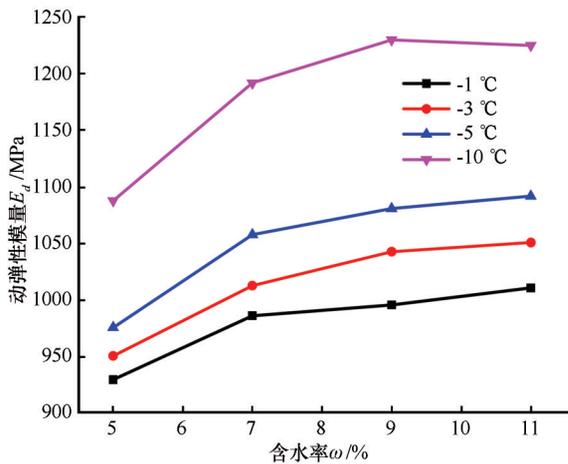


图9 动弹性模量与含水率的关系

Fig. 9 Relationship between dynamic elastic modulus and water content under various environment temperature

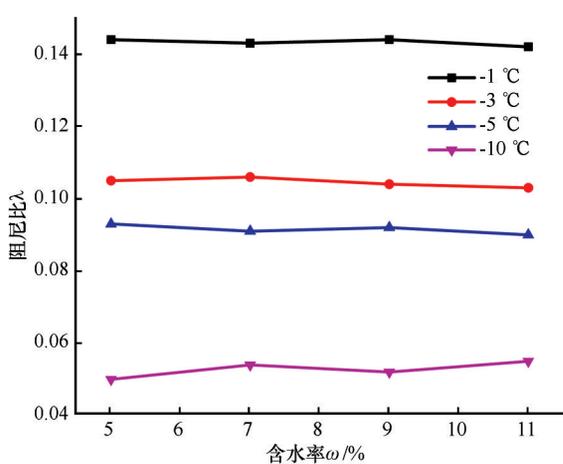


图10 阻尼比与含水率的关系

Fig. 10 Relationship between damping ratio and water content under various environment temperature

通过图9可以看出,在冻结温度相同的情况下,随着含水率逐渐增加土体的动弹性模量逐渐增大,但动弹性模量的增长速率随着含水率的增加而逐渐减小。这是因为随着土体含水率的增加在冻结后冰晶的含量也在增加,冰晶体产生的胶结作用逐渐增强,增大了土体的强度及刚度,从而表现出

动弹性模量的逐渐增加。随着含水率的逐渐增加,在水分增加的同时,冻结作用对土体结构产生的破坏也逐渐增大,进而出现动弹性模量增长速率减小的情况。

通过图10可以发现,随着含水率的增长冻结风积砂土的阻尼比略有减小,阻尼比随含水率的变化不明显,含水率对阻尼比的影响较小。同一含水率条件下,阻尼比随着环境温度的降低而逐渐减小。分析造成这种现象的原因为:水分在冻结过程中对土体造成的影响由两方面组成,一方面是随着含水率的增大,土中水分冻结时产生的结晶作用逐渐增强使得土体的强度和刚度逐渐增大,对动力波能量的吸收减小;另一方面是,随着含水率的增大在冻结过程中对土体结构的破坏就越大,这种破坏作用增大了土中的孔隙,使得土体对动力波能量的吸收有所增强。由于两方面作用的叠加,最终造成阻尼比与含水率之间的变化关系并不明显。

2.3 冻融次数对动弹性模量及阻尼比的影响

当冻结温度为-5 °C时,土体动弹性模量及阻尼比随冻融循环次数的变化如图11和图12所示。

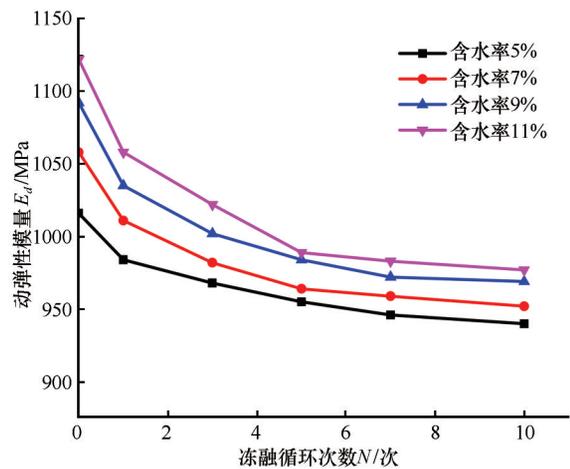


图11 动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig. 11 Relationship between dynamic elastic modulus and freeze-thaw cycles under various moisture contents

通过图11可以看出,当冻结温度及含水率一定时,土体的动弹性模量随着冻融循环次数的增加而逐渐降低,其中前5次的衰减较为明显。这是因为土中水分冻结时形成冰晶,在反复冻融过程中产生的楔形力使土体内部产生应力累积现象,当应力超过黏结力时,土颗粒相互脱离并重新排列,导致土体强度和刚度的下降。但由于不能得到水分的补充,随着冻融循环次数的增加这种破坏效应逐渐减

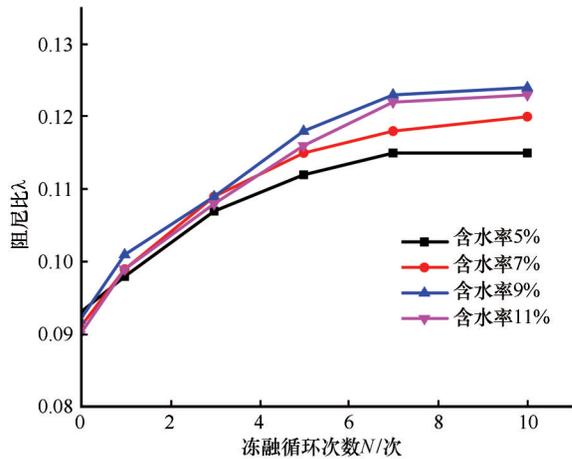


图 12 阻尼比与冻融循环次数的关系
Fig. 12 Relationship between damping ratio and freeze-thaw cycles under various moisture contents

弱,表现出冻融循环的后期动弹性模量衰减较小。

当冻结温度及含水率一定时,土体的动弹性模量随着冻融循环次数的增加而逐渐减小且在前3次冻融循环中,含水率较高的土样动弹性模量下降的程度较大。这是由于土中所含水分越多在冻结之后产生的楔形力越大,对土体结构的破坏作用就越强烈。当土体经历数次冻融循环后结构形式基本趋于稳定,表现出后期动弹性模量趋于稳定。

通过图 12 可以发现,未经历冻融循环的土样阻尼比与含水率之间无明显关系,随着冻融循环次

数的增加土体阻尼比逐渐上升,含水率较高的土样阻尼比上升幅度较大。这是因为土中水分含量越高在经历多次冻融循环后对土体结构的破坏越严重,使得土样中裂隙增多对动力波能量的吸收能力增强,从而出现阻尼比逐渐增大的趋势。

3 动力参数的修正

为方便工程应用,根据所得试验数据提出了适用于辽西风积砂土的两个修正系数,分别为温度、水分综合修正系数及冻融循环修正系数,可以用式(8)来表示。

$$\begin{cases} E_{dN} = \alpha_{\omega T} \cdot \alpha_N \cdot E_{d0} \\ \lambda_N = \beta_T \cdot \beta_N \cdot \lambda_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_{dN} 为某条件下(经历 N 次冻融循环,在某温度、含水率)的动弹性模量; E_{d0} 为初始条件下(未经历冻融循环,含水率为 5%, 温度为 $-1\text{ }^\circ\text{C}$)的动弹性模量; λ_N 为某条件下(经历 N 次冻融循环,在某温度、含水率)的阻尼比; λ_0 为初始条件下(未经历冻融循环,含水率为 5%, 温度为 $-1\text{ }^\circ\text{C}$)的阻尼比; $\alpha_{\omega T}$ 为动弹性模量的温度、水分综合修正系数; α_N 为动弹性模量的冻融循环修正系数; β_T 为阻尼比的温度修正系数; β_N 为阻尼比的冻融循环修正系数。

根据所得试验数据对各修正参数进行回归分析,可得修正参数与试验变量间的关系及回归方程,如图 13 和图 14 所示。

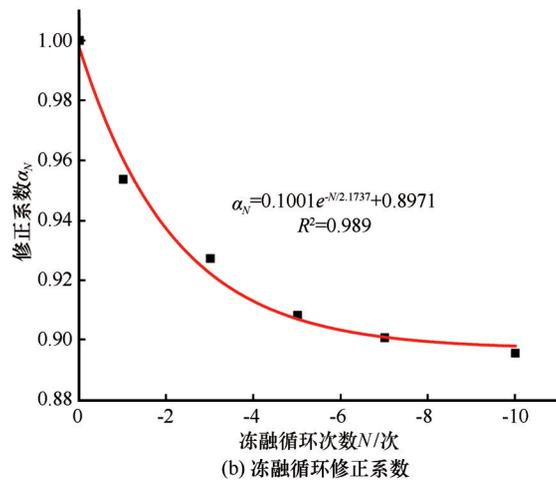
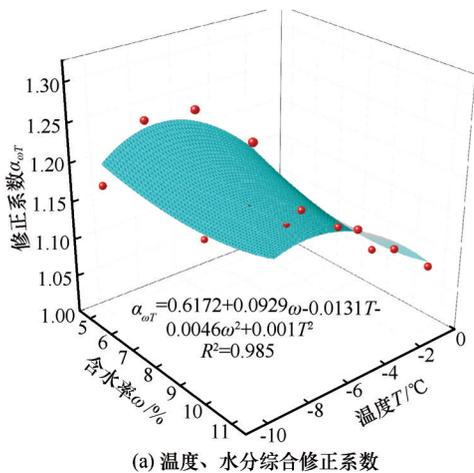


图 13 动弹性模量的修正系数

Fig. 13 Comprehensive correction coefficient of temperature and moisture (a) and freeze-thaw cycle number correction factor (b)

通过图 13(a) 可以发现,动弹性模量温度、水分综合修正系数随温度的降低逐渐上升,二者大致呈线性关系。这是因为随着环境温度的降低水分冻结时的结晶作用在逐渐增强,表现出修正系数随

温度的降低出现增大的趋势。修正系数随着含水率的增加而逐渐增加,修正系数在含水率为 5% ~ 9% 的区间范围内时修正系数的增长率较大,说明 5% ~ 9% 的含水率为修正系数的敏感区间,当含水

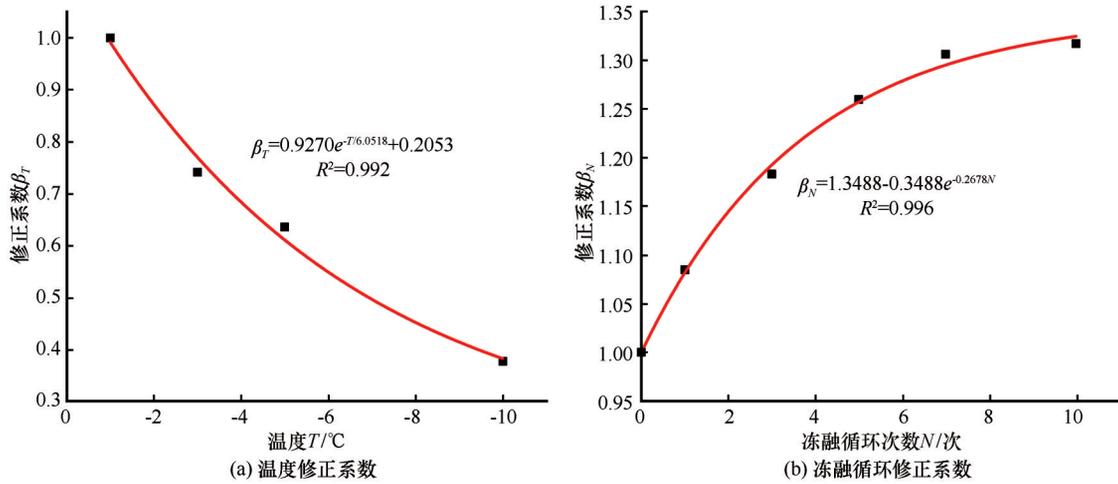


图 14 动弹性模量的修正系数

Fig. 14 Correction factors β_T changing with temperature (a) and β_N changing with freeze-thaw cycle number (b)

率继续增加时,修正系数的增长率开始减小。这是因为合理水分含量的土体在低温环境中发生冻结时,由于冰晶体的结晶作用增大了土颗粒间的胶结作用使土体在冻结后出现较大的修正系数增长率,当含水率继续增加时,过多的水分对土体结构产生较大的破坏使得修正系数的增长率逐渐减小。

通过图 13(b)可以看出,冻融循环修正系数在前 5 次冻融循环内变化较大,之后变化逐渐趋于稳定。说明前 5 次冻融循环对土体动弹性模量的影响较大,这是因为在前几次的冻融循环中由于水分冻结对土体结构产生了不可逆的破坏造成动弹性模量的衰减,表现出冻融循环修正系数的逐渐减小的趋势。由于无法获得水分的补充使得动弹性模量与修正系数的衰减在冻融循环的后期趋于稳定。

从试验结果及分析可知,水分对阻尼比的影响很小,所以将阻尼比的修正系数进行简化只考虑温度对阻尼比的影响。由图 14(a)可知,阻尼比温度修正系数随温度的降低而逐渐降低,二者大致呈指数变化关系。这是由于温度影响了土中水分的冻结,环境温度越低土体中的冰晶的结晶作用越强,胶结作用越强,冻土越坚硬,其塑性变形能力相对减弱,同一振动周期内吸收振动能量的能力减弱,阻尼比逐渐减小,修正系数出现逐渐减小的趋势。

通过图 14(b)可知,冻融循环对土体的阻尼比的影响在循环的初期较为明显,之后影响程度逐渐减小。这是因为冻融循环对土体结构造成了破坏,使得土体结构变得松散对振动能量的吸收能力增强,但破坏程度有限,造成修正系数的增长速率出现由大变小的趋势。

综上所述,所提出的动弹性模量及阻尼比修正系数,可以较好地反映出风积砂土在不同冻结条件下的变化规律,具有一定的精度,可以为季节冻土区的铁道工程建设提供参考。

4 结论

本文利用 GDS 冻土动态三轴测试系统,对不同冻结条件下京沈客专沿线的风积砂土的动力参数进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 温度对风积砂土动弹性模量及阻尼比的影响较大,随着环境温度的降低土体动弹性模量逐渐增大,土体强度、刚度逐渐增强,二者大致呈线性关系。随温度的降低土体阻尼比逐渐减小,对振动能量的吸收能力减弱,二者呈现出指数关系。

(2) 水分对风积砂土弹性模量的影响较大,5%~9% 含水率为风积砂土的敏感区间,在此区间内土体动弹性模量的变化较为明显。水分对土体阻尼比影响较小,随着水分的增加阻尼比出现轻微减小的趋势。

(3) 冻融循环可以对风积砂土的动弹性模量及阻尼比产生较大的影响,随着冻融次数的增加,土体动弹性模量逐渐减小,阻尼比逐渐增大。冻融循环的前 5 次对土体的影响较为明显,之后影响程度逐渐减弱。动弹性模量、阻尼比与冻融次数之间大致呈指数关系。

(4) 根据温度、水分、冻融循环对风积砂土的影响规律提出了动弹性模量及阻尼比的修正系数,修正系数可以较好地反映出风积砂土在不同冻结条件下的变化规律,具有一定的精度,可以为季节冻

土区的铁道工程建设提供参考。

参考文献(References):

- [1] He Fei, Wang Xu, Liu Deren, et al. Experimental study on dynamic characteristic parameters of undisturbed frozen sandy soil of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(6): 112 - 117. [何菲, 王旭, 刘德仁, 等. 青藏铁路原状冻结砂土动力特性参数试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(6): 112 - 117.]
- [2] Yu Xiaobo, Sun Rui, Yuan Xiaoming, et al. Influence of negative temperature on dynamic shear modulus and damping ratio of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1452 - 1465. [于啸波, 孙锐, 袁晓铭, 等. 负温对土动剪切模量阻尼比的影响规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1452 - 1465.]
- [3] Wang Jing, Lü Xiang, Zhang Yunlong, et al. Study on relationship static and dynamic moduli of subgrade soil in seasonal frozen area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(9): 25 - 30. [王静, 吕翔, 张云龙, 等. 季冻区路基土静动模量关系研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(9): 25 - 30.]
- [4] Wang Jing, Liu Hanbing, Wu Chunli, et al. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 633 - 639. [王静, 刘寒冰, 吴春利, 等. 冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 633 - 639.]
- [5] Luo Fei, He Yiting, Zhao Shuping, et al. Experimental study of damping ratio of frozen soil under stepwise loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3143 - 3149. [罗飞, 何依婷, 赵淑萍, 等. 分级加载下冻土阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3143 - 3149.]
- [6] Yan Han, Wang Tianliang, Liu Jiankun, et al. Experimental study of dynamic parameters of silty soil subjected to repeated freeze-thaw [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 683 - 688. [严晗, 王天亮, 刘建坤, 等. 反复冻融条件下粉砂土动力学参数试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 683 - 688.]
- [7] Vinson T S. Response of frozen ground to dynamic loadings: Chapter 9 in geotechnical engineering in cold regions [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1978: 405 - 458.
- [8] Czajkowski R L, Vinson T S. Dynamic properties of frozen silt under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Div., ASCE, 1980, 106(GT9): 963 - 980.
- [9] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Lai Yuanming, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(4): 999 - 1009.
- [10] Luo Fei, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Study of determining the dynamic parameters of frozen clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1340 - 1345. [罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 冻结黏土的动力参数确定方法研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1340 - 1345.]
- [11] Liu Yutong, Yang Lin. Study of the mechanical properties of stabilized soil containing PPF under freezing and thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 850 - 857. [刘雨彤, 杨林. 冻融作用下PPF稳定土力学性能研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 850 - 857.]
- [12] Wang Qiang, Yin Yuting, Cui Jinyang, et al. Research of the strength model of cement solidified lead-contaminated soil under freezing and thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 623 - 628. [王强, 尹钰婷, 崔进杨, 等. 冻融循环条件下水泥固化铅污染土强度模型研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 623 - 628.]
- [13] Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10001 - 2005, Code for design on subgrade of railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. [中华人民共和国铁道部. TB 10001 - 2005, 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.]
- [14] Xiao Donghui, Ma Wei, Zhao Shuping, et al. Study of the dynamic parameters of frozen soil: achievements and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1611 - 1626. [肖东辉, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻土动力学参数研究的成果综述与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1611 - 1626.]
- [15] Zhan Yongxiang, Jiang Guanlu. Study of dynamic characteristics of soil subgrade bed for ballastless track [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 392 - 396. [詹永祥, 蒋关鲁. 无砟轨道路基基床动力特性的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 392 - 396.]
- [16] Wang Qiyun, Zhang Jiasheng, Wang Jia. Large-scale triaxial test study on subgrade filler of group B-coarse grained soil of high speed railway [J]. Industrial Construction, 2014, 44(10): 86 - 90. [王启云, 张家生, 王佳. 高速铁路路基粗粒土B组填料大型动三轴试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(10): 86 - 90.]
- [17] Luo Fei, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Quantitative research on morphological characteristics of hysteretic curves of Qinghai-Tibet frozen clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 208 - 215. [罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 青藏冻结黏土滞回曲线形态特征的定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 208 - 215.]
- [18] Jiao Guide, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Evolution laws of hysteresis loops of frozen soil under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1343 - 1349. [焦贵德, 赵淑萍, 马巍, 等. 循环荷载下冻土的滞回圈演化规律[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1343 - 1349.]

Experimental study on dynamic parameters of aeolian sand in western Liaoning Province under different freezing conditions

ZHANG Xiangdong¹, REN Kun², LIU Jiashun¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the influence of different freezing conditions on the dynamic parameters of aeolian sand in western Liaoning Province, taking the Fuxin Section of Beijing to Shenyang Passenger Line as the research background, the effects of temperature, water content, freeze-thaw cycles on dynamic elastic modulus and damping ratio of frozen soil were tested by using GDS dynamic triaxial testing system. The variations of dynamic modulus and damping ratio of soil were obtained, and the correction coefficient of aerodynamic parameters of aeolian sand was proposed. The changes of dynamic modulus and damping ratio of soil were obtained, and the correction coefficient of dynamic characteristic parameters of aeolian sand was given from the test. The results show that with decrease of ambient temperature, the dynamic modulus of soil increases gradually, and the damping ratio decreases gradually. The temperature is approximately linear changing with elastic modulus, and is exponentially related to damping ratio. With the increase of water content, the dynamic modulus of soil increases gradually; there is a sensitive interval of water content, in which the dynamic modulus of elasticity changes obviously. The relationship between water content and damping ratio is not very obvious, and the damping ratio decreases slightly with the increase of water content. With increase of freeze-thaw cycles, dynamic elastic modulus decreases gradually, and the damping ratio increases gradually. During the first five freeze-thaw cycles there is great influence on the dynamic parameters of soil, and then the influence decreases gradually. The correction coefficient of the dynamic parameters of the aeolian sand is worked out, which reflects the variation of the dynamic parameters of the soil under different freezing conditions, and would be useful for railway construction in seasonal frozen areas.

Key words: dynamic modulus; damping ratio; temperature; water content; freeze-thaw cycle; correction coefficient

(责任编辑: 李国玉; 编辑: 周成林)