

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0012

WANG Dan, LIU Enlong, YANG Chengsong. Influence of the freeze-thaw cycles on dynamic mechanical properties of frozen mixed soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):524-534. [王丹, 刘恩龙, 杨成松. 冻融循环作用下冻结掺和土料动力特性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):524-534.]

冻融循环作用下冻结掺和土料动力特性研究

王 丹^{1,3}, 刘恩龙^{1,2}, 杨成松¹

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 冻融循环作用是寒区土体力学性质改变的主要影响因素之一。为研究冻融循环作用下寒区冻结掺和土料的动力特性(包括动变形和动强度),以寒区高土石坝砾石掺和土坝料为研究对象,采用低温振动三轴材料试验机,对不同冻融循环次数(0、5、20次)下的冻结掺和土试样进行不同围压和不同动应力幅值比条件下的低温动力循环三轴试验,探讨冻融循环作用对冻结掺和土料的动应力-动应变关系、体变-滞回曲线、轴向累积应变、动回弹模量、残余应变以及动强度的影响。结果表明:随着冻融循环作用次数的增加,冻结掺和土料的动应力-动应变曲线和体变曲线逐渐稀疏,且试样达到破坏应变的振动次数呈线性减小。通过对不同冻融循环次数下冻结试样的滞回曲线、轴向累积应变、残余变形的研究,发现冻融循环作用使得试样抵抗变形的能力下降。随冻融循环次数的增加,试样的动回弹模量减小,动强度逐渐降低,试样更容易发生破坏。研究结果较好地解释了冻结掺和土料在冻融循环作用下动力变形的机制,可为基于动力变形控制的寒区工程基础设计提供科学参考。

关键词: 冻结掺和土料; 冻融循环; 动力循环三轴试验; 动力特征

中图分类号: P642.14; TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0524-11

0 引言

随着高土石坝、基础工程建设等的修建,粗颗粒土的力学性质已成为岩土工程中重要的研究课题之一^[1]。在寒区,以一定粗颗粒含量的掺和土为填料的路基、坝基以及土石混合物边坡^[2]等经常遭受冻胀和融沉病害,易造成基础的变形和开裂等,这些病害与冻融循环作用息息相关。此外,建筑物的地基、天然土坡或土工结构物中的土体,在静荷载作用下将产生静应力和变形。但是,在某些情况下,由于地震、风浪、爆破、车辆或机械振动,土体将产生动应力和动变形,并附加于静应力及相应变形之上,这将是一个比静荷载单独作用时更为复杂的力学过程。研究指出,寒区岩土材料在遭受冻融循环和动力荷载的双重作用时,土体承载性能显著劣化,累积塑性应变增加,产生不可恢复的永久变形,

进而造成工程结构的损伤和破坏,严重影响寒区工程的服役性能和运营安全^[3]。由此可见,研究寒区冻结掺和土料在冻融循环作用和动力荷载共同作用下力学与变形性能的变化具有重要的意义。

随着环境温度的周期性变化,岩土材料中的水分发生反复的相变作用,造成土料强烈的风化劣化,使得土体中矿物颗粒间的排列和联结改变,宏观上表现为试样力学性质的弱化^[4-8]。Liu等^[9]研究了季节冻结区粉质砂土经过12次冻融循环作用后其静力学特性的变化,分析得出冻融循环作用改变了试样的应力-应变特征、破坏强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角。由于冻融循环作用的复杂性,学者们关于冻融循环作用对土强度的影响结论差异性较大,发现冻融使得土的强度有所降低,也有研究表明冻融后的土样强度有所增加,还有一些研究认为冻融前后土的强度基本保持不变^[10-13]。可见,

收稿日期: 2021-09-13; 修订日期: 2021-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771066)资助

作者简介: 王丹,博士研究生,主要从事冻土动力学及动力本构关系研究. E-mail: dwang1922@lzb.ac.cn

通信作者: 刘恩龙,教授,主要从事土的本构关系与数值模拟研究. E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

冻融循环作用对岩土材料力学性质的影响非常复杂。此外,学者们也关注于冻融循环作用对土体动力性质的影响。目前,学者们研究了冻融循环作用后融土的动力特性变化规律,Lu等^[14]研究了西南地区路基土在不同冻融循环次数下其塑性累积变形的变化特征,指出冻融循环对土样塑性累积变形具有强烈的影响。Kong等^[15]分析了混合土(含粉粗颗粒砂土)遭受不同冻融循环作用后在多级动力加载条件下,其动剪切模量和泊松比的削减。Tian等^[16]探讨了含砂颗粒混合土在不同冻融循环次数下动剪切模量和泊松比的影响。苏永奇等^[17]研究了冻融循环对融化状态青藏粉质黏土动力非线性参数的影响,指出冻融循环对土体动力骨干曲线和动剪切模量比有显著的影响。冻土中由于胶结冰的存在,动力荷载作用下表现出更加复杂的变化^[18-21],如塑性变形的累积^[22]、疲劳损伤^[23],以及动力变形的滞回性^[24]等。Xu等^[25]研究了冻结黏土在动力加载条件下冻融循环对塑性累积应变的影响,给出了塑性累积应变的预测模型。Fan等^[26]对冻结黏土进行不同冻融循环试验和动力加载试验,分析了塑性累积应变的变化规律,并指出冻结黏土的塑性累积变形可以分为两个阶段,即压实后的压缩阶段和第二个循环压缩阶段。以上的研究或局限于单一土料的动力特性研究,或局限于试样个别动力参数的研

究,不能系统且全面的反映冻结掺和土料在冻融循环作用下的动力特性。

基于此,本文以寒区砾石掺和土料为研究对象,通过开展不同冻融循环次数下的冻结掺和土料在不同加载条件(围压和动应力幅值比)下的动力循环加载试验,讨论分析了冻融循环作用对冻结掺和土料动应力-应变曲线和动体变曲线的影响,系统地探讨了冻融循环次数对冻结掺和土料的动力破坏振次、滞回曲线、轴向累积应变、回弹模量、残余变形以及动强度变化规律的影响。

1 试样制备及试验方法

1.1 试验材料及试样制备

试验所用的土料取自青藏高原东南沿某特高土石坝施工现场,场地所在地年平均气温 10.9℃,极端最低温度为-15.9℃^[27]。根据现场实际工程条件,选用接触黏土与粒径为 2~5 mm 的砾石作为室内研究对象,二者按照砾石含量为 30% 组成掺和土料,如图 1 所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)对试验土样分别进行基本物理参数测试和击实试验,分别获得接触黏土的液限、塑限和塑性指数,如表 1,接触黏土的粒径级配曲线如图 2,同时可知掺和土料的最大干密度为 1.97 g·cm⁻³ 以及最优含水率为 11.8%。

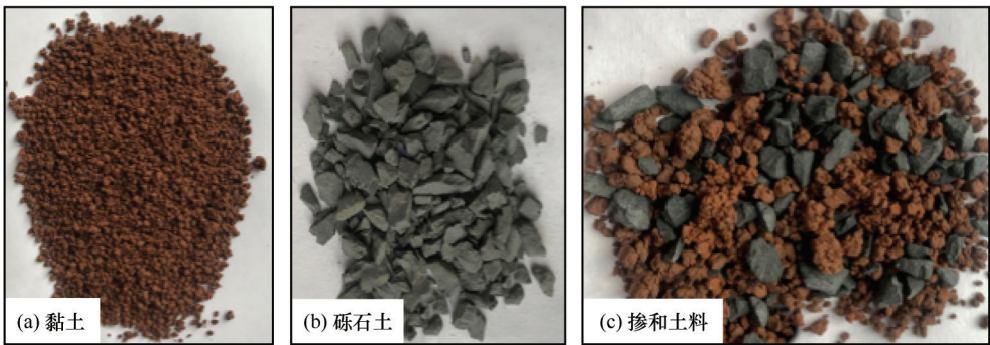


图 1 试验土样
Fig. 1 Tested soils

表 1 接触黏土的基本物理参数
Table 1 Basic physical properties of clay

土样	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	塑性指数 I_p
接触黏土	27.5	15.9	11.6

冻结掺和土料(砾石含量为 30%)试样的具体制备方法如下所述。首先对土样进行晒干和碾压并过 2 mm 标准筛,而后按照控制混合土的最大干

密度 1.97 g·cm⁻³进行配土,添加蒸馏水使土样的含水率达到最优含水率 11.8%,为确保试样含水量的均匀性,将配置的土样置于密封袋中静置 24 小时。采用冻土工程国家重点试验室研制的制样机,将掺和土料按照其最大干密度(1.97 g·cm⁻³)压制成高 125 mm,直径为 61.8 mm 的三轴试验标准试样,其中试样符合高径比大于 2 的要求,如图 3(a)所示。随后,将试样侧向套箍三瓣膜,试样上下两端分别

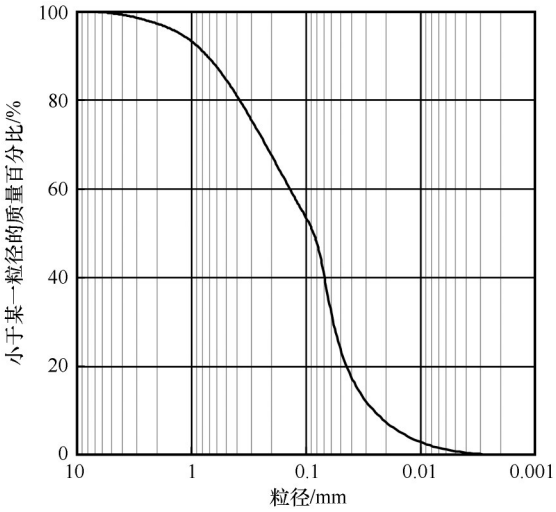


图2 接触黏土的颗粒级配曲线
Fig. 2 Particle size distribution curve of clay

放置透水石,如图3(b),置于密闭真空饱和压力罐中,抽取真空4小时,抽真空完毕后注入纯净水使试样充分饱和12小时,真空饱和结束后测得试样的饱和度大于95%,如图3(c)所示。试样饱和完成后将其上下两端的透水石换成防止透水的环氧树脂垫

片,并放置于-30℃控温冰箱进行快速冻结(防止冰透镜体的产生),冻结48小时。最后脱下冻结试样的三瓣膜,制成标准冻结试样(61.8 mm×125 mm),套上橡皮套,放置于-10℃恒温冰箱静置24小时后进行冻融循环试验[如图3(d)所示]和循环三轴试验。

1.2 试验仪器及方法

为了探究冻融循环作用下冻结掺和土料的动力特征及变形特性,试验过程包括冻融循环试验和低温动力循环加载试验两部分。

1.2.1 冻融循环试验

将制备好的冻结试样放入可控温的恒温箱内,使其在规定的负温下冻结和正温下融化,每一个冻融循环周期为24 h,即试样在-10℃下冻结12 h,室温(23℃)下融化12 h,确保试样能够达到指定负温和完全融化。共制备试样36件,按照围压(0.3 MPa、1.0 MPa、1.4 MPa)分为3组,每一组12个试样(3个试样用来备用)依次进行0次、5次和20次冻融循环试验,而后进行不同动应力幅值比下的动力循环加载试验。

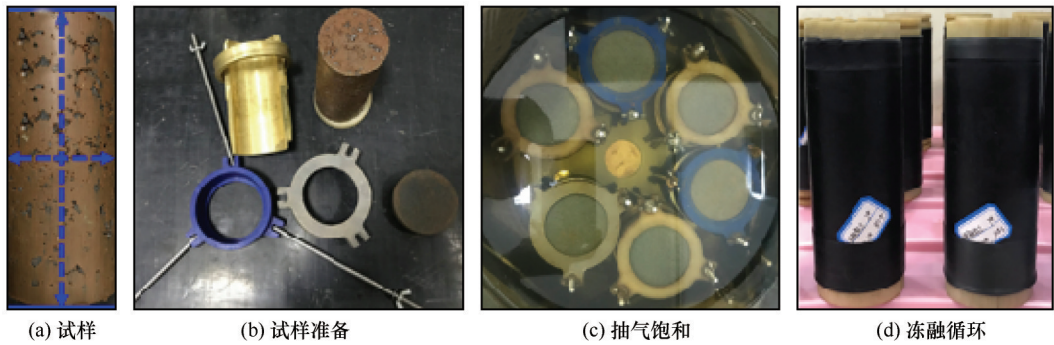


图3 冻结试样的准备过程
Fig. 3 Specimens preparation: specimen (a); preparation (b); saturation (c); freeze-thaw cycles (d)

1.2.2 低温动力循环加载三轴试验

将上述3组试样分别在低温MTS-810材料测试仪里面进行-10℃下的动力循环加载试验,如图4所示。该测试仪器由加载装置、压力舱、液压系统、制冷系统和数据采集系统五部分组成,其可控制的温度范围为-30~20℃,同时试验过程中的轴压、围压、加载速率、加载频率以及加载方式可由电脑同步控制,可以采集试样加载过程中的加载时间、轴向位移、轴压、围压位移、围压以及温度。

如图5所示,动力试验加载方式采用正弦波形,分别向试样上下两端施加不同的偏差应力来模拟往复循环荷载作用,加载过程为应力控制($\Delta\sigma=$

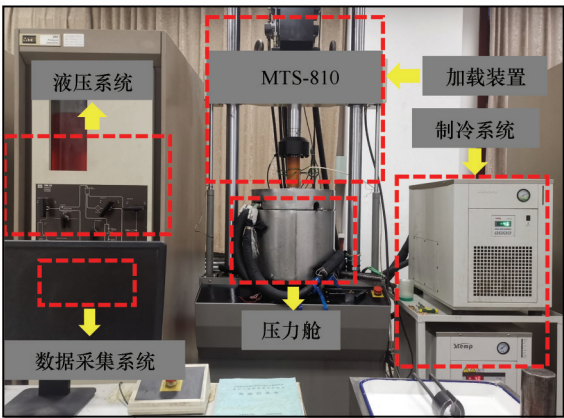


图4 低温MTS-810材料测试仪
Fig. 4 MTS-810 material test device

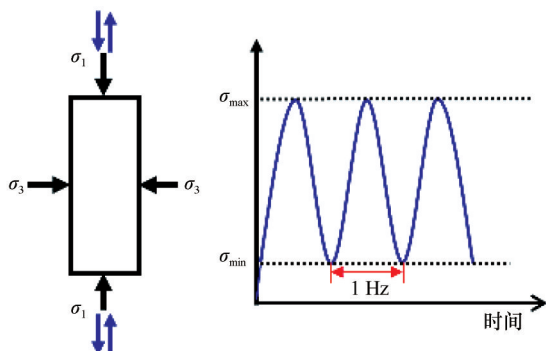


图5 动力加载方案

Fig. 5 The dynamic test procedures

0.0125 MPa)。轴向偏差应力的确定与试样的静强度相关,分别采用不同的动应力幅值比 R (0.80、0.90、0.98),通过所加动应力 σ_d 与对应围压和冻融循环次数下试样在静力荷载作用下强度的比值来确定。根据土动力破坏标准方法,本文选用应变破坏标准,即对于塑性破坏的冻土试样(如图6所示),以5%的轴向塑性累积应变作为应变破坏标准^[28],其对应的振次为试样的破坏振次。冻融循环作用下冻结掺和土料动力特性试验研究的具体研究方案如表2。



图6 塑性破坏的冻结掺和土料试样

Fig. 6 Plastic failure of frozen mixed soil

表2 试验方案

Tab 2 Test program

试样编号	围压/MPa	冻融循环次数 N_{F-T}	动应力幅值比 R
DT-M-01~12	0.3	0, 5, 20	0.80, 0.90, 0.98
DT-M-13~24	1.0	0, 5, 20	0.80, 0.90, 0.98
DT-M-25~36	1.4	0, 5, 20	0.80, 0.90, 0.98

2 冻融作用下冻结掺和土料的动力特性分析

反复的冻融循环作用易造成土体的力学性能产生变化,进而导致工程服役性能的削减。以冻融循环作用下冻土的动力循环三轴试验为基础,分析

探讨了冻融循环对冻结掺和土料的动应力-动应变曲线、体变曲线、振动破坏次数、滞回曲线、轴向累积应变、动弹性模量、残余应变以及动强度的影响,揭示了冻融作用对循环荷载下冻结土料的动力特性的影响规律。

2.1 动应力-动应变曲线和体变曲线变化规律

土体的动应力-动应变关系是表征土动力学特性的基本关系,也是分析土体动力失稳的重要基础。冻融循环通过改变土体内部结构与颗粒间的排列方式来改变其宏观动力特性,表现为不同冻融循环作用下土体动应力-动应变关系的变化。图7为相同动力加载条件($\sigma_3=0.3$ MPa; $R=0.98$)下,不同冻融循环次数($N_{F-T}=0, 5, 20$)下冻结掺和土料的动应力-动应变曲线及体变曲线。从图7可知,冻结掺和土料在往复荷载作用下其动应力-动应变曲线随着轴向变形的发展表现出强烈的非线性、滞回性和塑性累积性,其体变曲线则整体上表现为先体缩后体胀的变化趋势。此外,随着轴向应变的发展,曲线逐渐由稀疏变得密集,说明在动力加载的初始阶段,试样产生较大的不可恢复的塑性变形,随着加载振次的累加,试样的塑性变形逐渐减小致使曲线逐渐密集。对比不同冻融循环次数下冻结掺和土料的动应力-动应变曲线和体变曲线,可以看出冻融循环作用并不改变试样的应力-应变和体变的表现形式,只改变其破坏次数(如图8所示),即随着冻融循环次数的增加,试样达到破坏应变的振次呈线性减小,表现为其动应力-动应变曲线和体变曲线逐渐变得稀疏,如图7所示。这主要是因为冻融循环作用使得冻结掺和土料试样抵抗动力破坏的能力产生一定程度的劣化,反复的冻融作用,增大了土体内的孔隙体积,水分相变产生的孔隙无法恢复到初始稳定状态,降低了颗粒间的胶结,在外力荷载作用下,试样更容易产生变形和达到破坏。

2.1 滞回圈曲线特征

滞回曲线是描述试样在动力荷载作用下每一个加载和卸载周期内动应力-应变随时间变化的曲线,其形态反映了冻土在动力荷载长期作用下的能量耗散,包括塑性耗散,黏滞性耗散和损伤耗散等。图9为冻结掺和土料在同一围压(0.3 MPa)和同一动应力幅值比(0.98)条件下,经历不同冻融循环次数下其滞回曲线随轴向应变的发展规律。由图9可知:(1)在第1个加载周期内,不同冻融循环次数下的试样均产生较大的变形和能量的耗散,但试样的

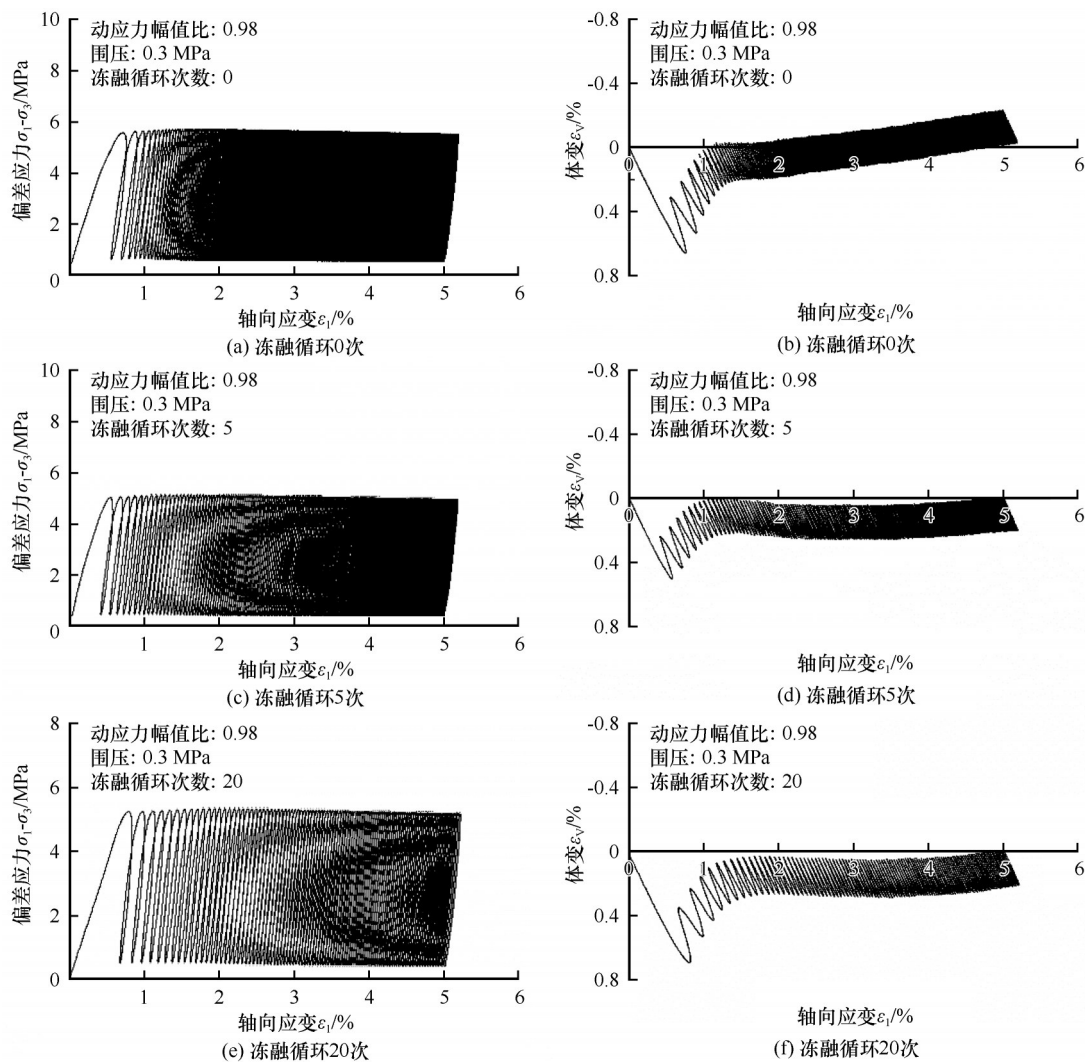


图7 不同冻融循环次数下冻结掺和土料的动应力-动应变曲线和体变曲线

Fig. 7 Dynamic stress-strain relationship and volumetric strain curves of frozen mixed soil under different freeze-thaw cycles

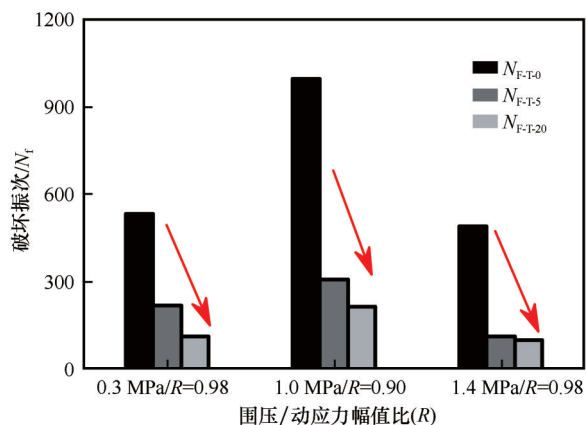


图8 不同冻融循环次数下冻结掺和土料的破坏振次

Fig. 8 Cyclic number at failure of frozen mixed soil under different freeze-thaw cycles

变形不具有规律性,主要是因为动荷载的突然施加使得试样的变形不稳定。(2)随着加载振次的增加,

不同冻融循环作用下试样的滞回曲线随轴向应变的发展表现出一定的规律性变化,即未经历冻融循环作用试样的滞回圈明显滞后于经历5次和20次冻融循环试样的滞回圈,说明在相同的加载振次下,未经历冻融循环的试样其塑性应变的发展较缓慢,变形较小,而经历冻融循环的试样则产生较大塑性变形。当加载振次 $N=1\ 000$ 时,未经历冻融循环的试样其滞回圈出现在轴向应变为6.97%的位置,而经历5次和20次冻融循环后的试样其滞回圈则分别到达了轴向应变为11.24%和11.41%的位置。从不同冻融循环次数下冻结掺和土料的滞回圈随轴向应变的发展趋势来看,冻融循环使得试样在动力荷载作用下更容易产生能量的耗散。

2.2 轴向累积应变的变化规律

轴向累积应变是指在整个动力加载过程中,试

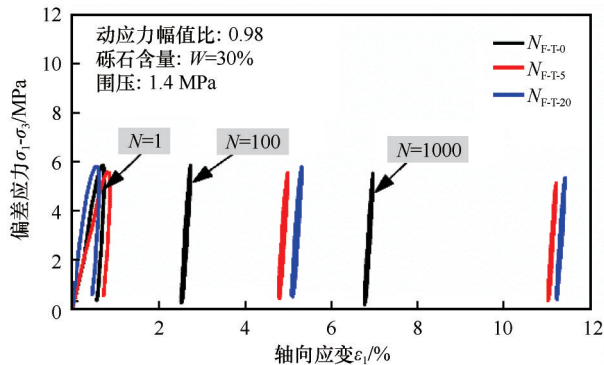


图9 不同冻融循环次数下滞回曲线随轴向应变的变化
Fig. 9 The hysteresis curves of frozen mixed soil under different freeze-thaw cycles with different cyclic numbers

样同时产生塑性变形和弹性变形,且每一个加载周期中的轴向变形随着循环加载周期的增大而不断累积,其大小可通过三轴循环加载原始数据确定,是研究地基土在荷载作用下长期变形的基础。图10给出了不同冻融循环次数下冻结掺和土料在不同围压(0.3 MPa; 1.0 MPa; 1.4 MPa)和同一动应力幅值比(0.80)条件下轴向累积应变的变化规律。

从图中可以看出,冻融循环作用对冻结掺和土料的累积变形特性有显著的影响,主要表现在以下

几个方面:1)在相同的围压和相同动应力幅值比条件下,冻结掺和土料的轴向累积应变随着冻融循环次数的增加而增加。在围压为0.3 MPa,动应力幅值比为0.80的加载条件下,未经历冻融循环的冻结掺和土料当加载振次为1 000时,其轴向累积应变为2.27%;而当冻结试样经历了20次冻融循环后,相同的加载振次下其轴向累积应变达到了5.79%。2)经历不同冻融循环作用下冻结掺和土料在动力荷载作用下的累积变形呈现出两种发展模式,当试样未经历冻融循环作用时,在同一加载振次条件下所产生的塑性应变较小,且塑性应变随着加载振次的增加而缓慢增加,呈蠕变模式(如曲线 N_{F-T-0});当试样经历5次和20次冻融作用后,塑性累积应变随着加载振次的增加而迅速增加直至破坏,呈现累积增长模式(如曲线 N_{F-T-5} ,曲线 N_{F-T-20})。从变形机理上分析来看,经历冻融循环后的试样在动力荷载作用下,更容易发生塑性应变的累积,主要是因为冻融循环作用改变了冻土颗粒间的胶结性能,从而降低了试样抵抗外界变形的能力。

2.3 回弹模量的变化

回弹模量是冻土动力学参数中的重要指标,定

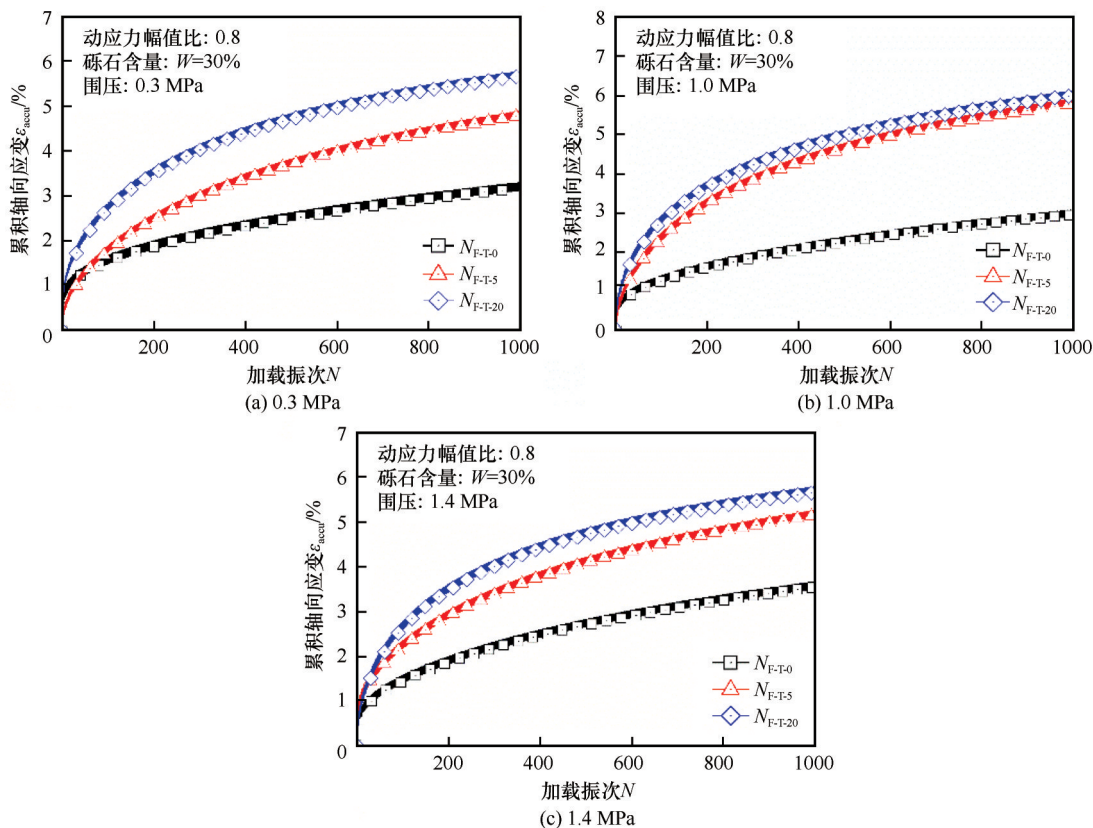


图10 不同冻融循环次数下冻结掺和土料塑性累积应变的变化规律

Fig. 10 The accumulative axial strain with different freeze-thaw cycles under different confining pressure

义为动力荷载作用下加卸载过程中曲线交点的斜率,其确定方法如图 11 所示,取每一个加载周期内可恢复的弹性段(点 A 和点 B),来计算回弹模量,即:

$$E_R = \frac{\sigma_{\max, A} - \sigma_{\min, B}}{\varepsilon_{\max, A} - \varepsilon_{\min, B}} \quad (2)$$

式中:点 A($\varepsilon_{\max, A}$, $\sigma_{\max, A}$)表示周期加载过程中应变的最大值点,点 B($\varepsilon_{\min, B}$, $\sigma_{\min, B}$)表示周期加载过程中应变恢复到达到的最小值点。

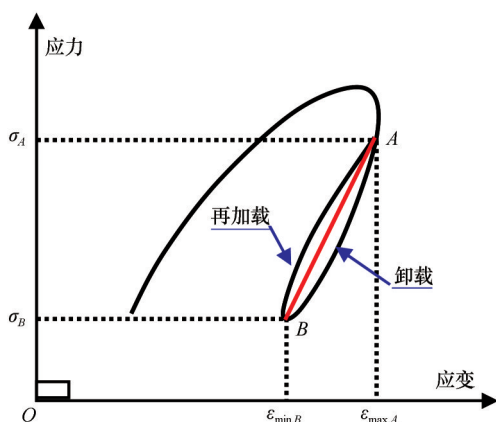


图 11 动弹性模量计算方法

Fig. 11 Calculation method of dynamic elastic modulus

冻融循环作用强烈改变冻土的回弹模量,图 12 给出了同一动应力幅值比和围压条件下,冻结掺和土料在不同冻融循环作用下回弹模量的变化。从图中可以发现,在动力加载的初期(轴向应变 $\varepsilon_1 < 2\%$),未经历冻融循环作用的冻结掺和土料,其回弹模量逐渐增大,随着轴向应变的发展($\varepsilon_1 > 2\%$),其回弹模量逐渐趋于稳定,如图 12 曲线 N_{F-T-0} 所示;而经历冻融循环后的试样,其回弹模量则先呈下降的趋势,然后逐渐趋于稳定,如图 12 曲线 N_{F-T-5} 和曲线

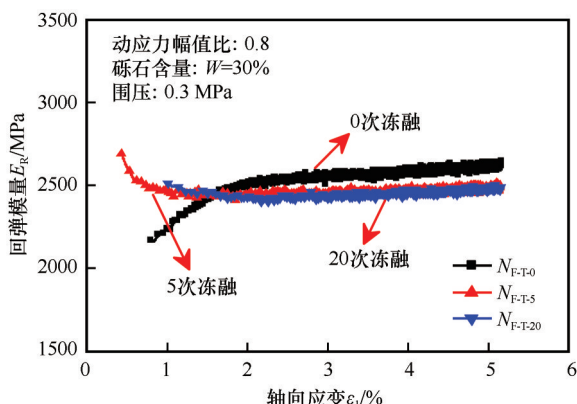


图 12 不同冻融循环次数下冻结掺和土料的回弹模量

Fig. 12 The variation of resilient modulus of frozen soil under different freeze-thaw cycles

N_{F-T-20} 所示。对未经历冻融循环作用的试样而言,随着动力荷载的施加,试样产生可恢复的弹性变形逐渐减小,试样趋于密实,土体的刚度增大,此时试样的回弹模量逐渐增大并趋于定值。对经历冻融循环作用的试样而言,冻融循环使得试样内部产生较多的孔隙,当动力荷载施加时,试样产生较大的变形,土颗粒之间相互错动,不断发生骨架颗粒的重组,最终逐渐转向新的稳定状态,表现为回弹模量的先衰减后趋于稳定的现象。这一变化现象,与不同冻融循环作用下滞回曲线和轴向塑性累积应的变化所反映的物理机制一致。此外,对比最终不同试样的回弹模量发现,冻融作用会造成冻结试样的动弹性模量减小,即未经历冻融循环作用的冻结掺和土料其回弹模量在 2 600 MPa 附近,而经历了 5 次、20 次的冻结试样,其回弹模量则在 2 450 MPa 上下波动。

2.4 残余变形的变化

动荷载作用下土的变形特性是土动力学研究的主要内容之一,其中土体的残余变形是表征动力变形最重要的部分,定义为每个加载周期内应变的最小值^[23]。在整个动力荷载加载过程中,残余变形稳定增长,且动荷载停止后变形不可恢复。图 13 为同一动力动应力幅值比和不同围压条件下,遭受不同冻融循环作用后冻结掺和土料的残余变形曲线。试验结果表明,低围压加载条件下,冻融循环作用对试样残余应变的影响明显,即随着冻融循环次数的增加,试样的残余变形增加。以围压为 0.3 MPa 加载条件为例,主要是因为冻结掺和土料由于粗颗粒的掺入易产生大的孔隙,初始冻结时,这些大孔隙被冰晶填充,随着温度的周期性变化,试样内部的水分反复发生相变,改变了试样的内部结构,颗粒间产生孔隙,当动力荷载施加时,试样易发生变形。而在高围压条件下时,不同冻融循环次数下冻结掺和土料的残余变形随加载振次的增大而趋于一致,未表现出明显的规律。主要是由于受围压的作用,在变形过程中土颗粒将发生重新排列,且随着围压的增大,颗粒间的胶结作用得到一定的增强,试样在变形过程中剪胀得到抑制,此时,围压对试样变形的影响大于冻融循环对试样变形的影响,进而导致高围压作用下,试样的残余变形规律性不明显。

2.5 动强度的变化特征

冻土的动强度是指在荷载反复作用次数下产生某一指定破坏应变时所需的动应力,是寒区动力

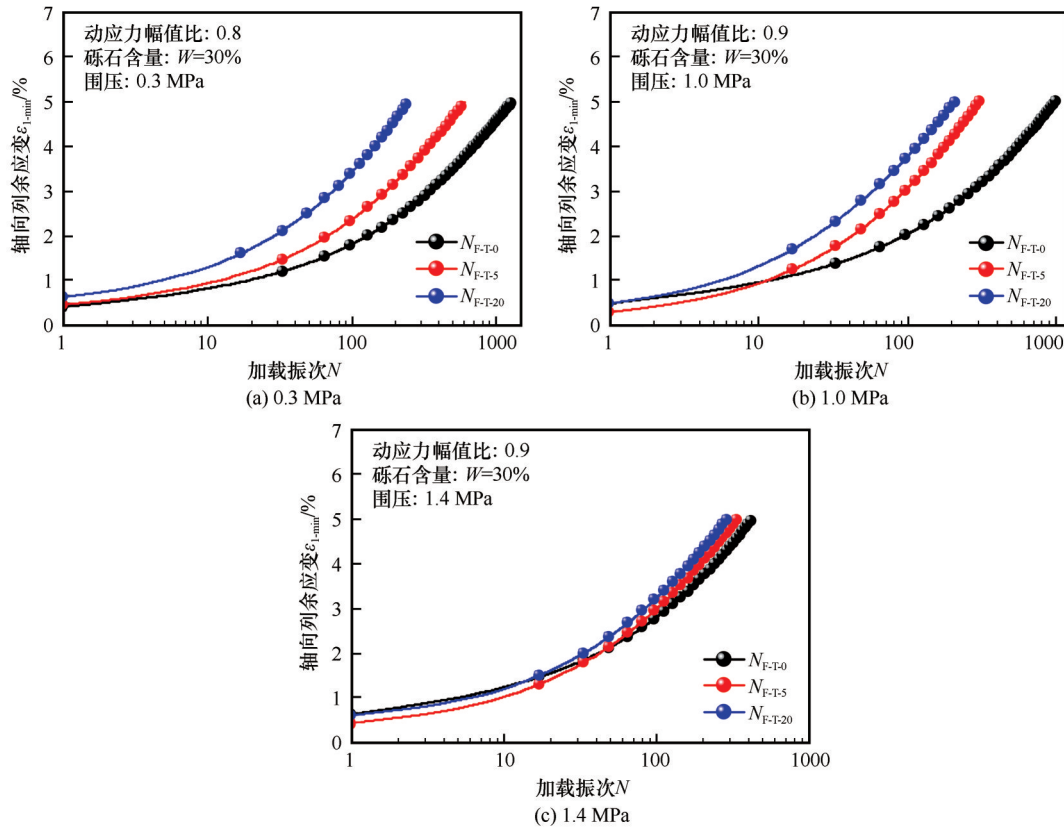


图 13 冻融循环作用下冻结掺和土料残余应变的变化

Fig. 13 The relationship between residual axial strain and the number of cycles of frozen mixed soil

工程基础设计的重要依据。本文基于极限应变法确定冻土的动强度,即在循环荷载作用下,当冻土轴向应变达到5%时,认为土体发生破坏,根据破坏应变所对应的动应力值,绘制动强度变化曲线,其中横坐标采用加载破坏振次的对数坐标($\lg N_f$),纵坐标采用轴向动应力幅值(σ_d),得到如图14所示的不同冻融次数下冻结掺和土料的动强度曲线。试验结果表明,动强度曲线随冻融循环次数的增加而降低,即冻融循环次数越大,动强度愈低,同一冻融循环作用下,试样的动强度随加载振次的增加而线性减小。对比不同围压下试样动强度的变化曲线,随着冻融循环次数继续的增大,在低围压($\sigma_3=0.3\text{ MPa}$)下,冻结掺和土料的动强度曲线逐渐降低;在相对高围压($\sigma_3=1.0\text{ MPa}$; $\sigma_3=1.4\text{ MPa}$)下,试样的动强度变化曲线逐渐重叠,其动强度曲线变化形式趋于一致,即冻融循环5次后,试样的动强度特征基本保持稳定。

3 冻融循环以及动力加载条件下冻结掺和土料的破坏特征

受温度周期波动的影响,土体内的水分发生反

复的冻结和融化,改变了土体内部的结构,并由此导致土体力学性质的改变。如图15给出了经历不同冻融循环作用后冻结掺和土料的动力破坏示意图。从图中可以看出,初始冻结状态的掺和土料是由黏土颗粒团聚体、砾石、冰颗粒以及少量的未冻水组成,在负温条件下,黏土团聚体与较大粒径的砾石、冰颗粒共同构成冻土的骨架颗粒,各相间由于胶结作用相互支撑,构成相对稳定的土体结构,如图15(a)所示。随着温度的升高,冻结掺和土料逐渐融化,土体内的冰晶相变成水,相对体积减小9%,产生一定的孔隙,且矿物颗粒由于重力作用相互靠近并重新定向排列,造成黏土团聚体与砾石间的孔隙增大。接着温度逐渐降低,掺和土料从融化状态转变为冻结状态,此时土体内孔隙、小孔隙以及超小孔隙中生长冰晶,进一步增加了矿物颗粒间的孔隙体积,由于没有水分的补充,造成试样产生无冰填充的微裂纹,如图15(b)所示。此时施加循环动荷载时,固相颗粒间胶结发生破坏,颗粒间产生滑移,致使试样发生破坏。由于冻融作用造成冻结掺和土料体内的孔隙体积增多,微裂纹增加,矿物颗粒间的接触面积减小,试样抵抗外力变形的能

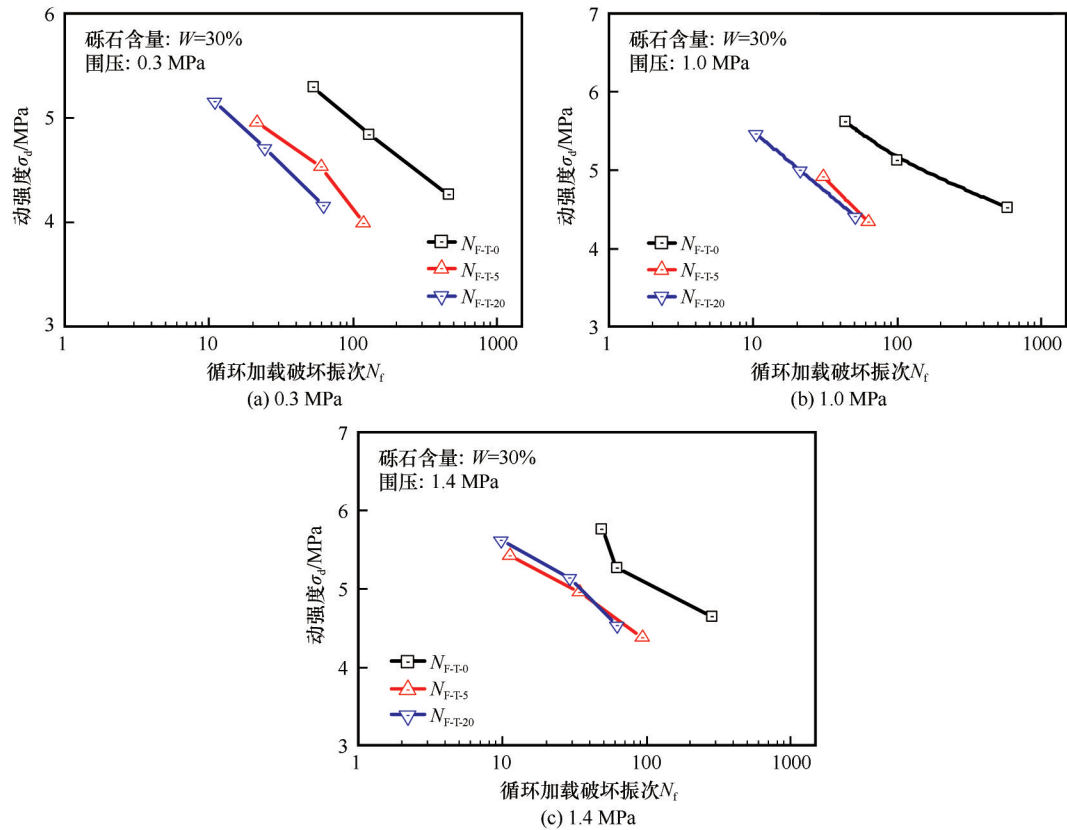


图 14 冻融循环作用下冻结掺和土料动强度变化曲线

Fig. 14 The dynamic strength for frozen mixed soil subjected to different freeze-thaw cycles

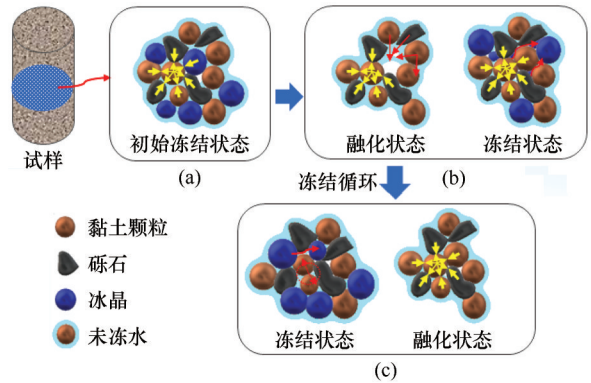


图 15 冻融循环作用下冻结掺和土料的动力破坏机制

Fig. 15 Dynamic failure mechanism of frozen mixed soil under freeze-thaw cycles

力减弱,表现为其动应力-应变曲线逐渐变得稀疏,塑性累积应变增加,动弹性模量的减小,残余应变累积变形速度的增大以及动强度逐渐降低。在温度的周期性改变下,如图 15(c)所示,随着冻结掺和土料经历冻融循环次数的增加,试样内部发生反复的冰水相变过程,冰的劈裂作用使得黏土颗粒团聚体易产生微裂隙,造成大粒径的黏土团聚体分离,孔隙度增加^[29],同时在外力作用下,砾石颗粒与黏

性团聚体重新组合和堆积,为了达到相对稳定状态,必须要经历长时间的结构的调整 and 改变,这些改变和调整易造成冻结试样发生弱化。此时施加动力荷载作用时,试样更容易发生破坏,表现为动应力-应变曲线更加稀疏,即在较少的加载振次下,试样就达到了破坏,同时产生较大的累积变形和残余应变,造成了动弹性模量的进一步降低和动强度减弱。

4 结论

基于对不同冻融循环次数下冻结掺和土料动力特性的研究,揭示了冻融循环作用对冻结掺和土料动应力-动应变曲线、体变曲线、破坏振次、滞回曲线、塑性累积应变、动回弹模量、残余应变,以及动强度的影响,得到以下结论:

(1)冻融循环作用显著影响冻结掺和土料的动力特性。随着冻融循环次数的增加,冻结掺和土料的动应力-动应变曲线和体变曲线逐渐趋于稀疏,即在经历冻融循环作用后的试样在较少的加载振次下便达到了破坏。同时,冻融循环作用使得试样在循环荷载作用下呈现出较大的能量耗散和不可

恢复的塑性变形。此外,随着冻融循环次数的增加,冻结掺和土料的动强度逐渐降低,且同一加载条件下,动强度随加载振次的增加而线性减小。

(2)冻融循环作用显著影响试样的动力变形特性。在相同的加载周期内,随着冻融循环次数的增加,冻结试样的滞回曲线随轴向应变发展较快。同时,试样的轴向累积应变随冻融循环次数的增加而逐渐增大,试样的产生残余变形的速率随冻融循环次数的增加逐渐加快。

(3)未经历冻融循环作用的冻结掺和土料其回弹模量与经历冻融循环作用后试样的回弹模量表现出不同的变化形式,即未经历冻融循环作用的试样,其回弹模量在加载的初始阶段逐渐增大而后随着加载振次的增加逐渐趋于稳定,而经历冻融循环作用后的试样,随着加载振次的增加,其回弹模量逐渐减小随后逐渐趋于稳定值。整体而言,随着冻融循环次数的增加,冻结掺和土料的回弹模量逐渐减小。

参考文献(References):

- [1] Zhang Ga, Zhang Jianmin. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. [张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591.]
- [2] Wang Shengnian, Zhu Yin, Ma Wei, et al. Effects of rock block content and confining pressure on dynamic characteristics of soil-rock mixtures[J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105963.
- [3] Hu Feng, Li Zhiqing, Tian Yifan, et al. Failure patterns and morphological soil-rock interface characteristics of frozen soil-rock mixtures under compression and tension[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 461.
- [4] Zhang Ze, Ma Wei, Qi Jilin. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1904-1914. [张泽, 马巍, 齐吉林. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1904-1914.]
- [5] Wang Dan, Yang Chengsong, Cheng Guodong, et al. Experimental study on pore water pressure and microstructures of silty clay under freeze-thaw cycles[C]//Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2, 2020: 239-254.
- [6] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.]
- [7] 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.
- [8] Chang Dan, Liu Jiankun. Review of the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of soil[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(4): 457.
- [9] Liu Jiankun, Chang Dan, Yu Qianmi. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 23-32.
- [10] Broms B B, Yao L Y C. Shear strength of a soil after freezing and thawing[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1964, 90(4): 1-25.
- [11] Chuvilin E M, Yazynin O M. Frozen soil macro-and-microstructure formation [C]//Proceeding of the 5th International Conference on Permafrost. Norway: Trondheim, 1988, 320-323.
- [12] Wang Jiacheng, Xu Xiaozu, Wang Yujie. Thermal sieve effect and convectional migration of soil particles during unidirectional freezing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(3): 252-255. [王家澄, 徐学祖, 王玉杰. 单向冻结时土颗粒位移的热筛效应及对流迁移[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 62-65.]
- [13] CHRISTOPHER S, CHRISTOPHER G. Freeze-thaw effects on Boston blue clay[J]. Journal of Engineering and Applied Science, Soil Improvement for Big Digs, 1998, 81: 161-176.
- [14] Lu Zheng, She Jianbo, Wu Xiaowen, et al. Cumulative strain characteristics of compacted soil under effect of freeze-thaw cycles with water supply[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100291.
- [15] Kong Xiangxun, Tian Shuang, Tang Liang, et al. Dynamic behavior of coarse-grained materials with different fines contents after freeze-thaw cycles under multi-stage dynamic loading: Experimental study and empirical model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 175: 103078.
- [16] Tian Shuang, Tang Liang, Ling Xianzhang, et al. Experimental and analytical investigation of the dynamic behavior of granular base course materials used for China's high-speed railways subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 139-148.
- [17] Su Yongqi, Ma Wei, Zhong Xiumei, et al. Experimental study of influence of freeze-thaw cycles on dynamic nonlinear parameters of Qinghai-Tibet silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl 1): 2973-2985. [苏永奇, 马巍, 钟秀梅, 等. 冻融循环对青藏粉质黏土动力非线性参数影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊1): 2973-2985.]
- [18] Li J C, Baladi G Y, Andersland O B. Cyclic triaxial tests on frozen sand[J]. Engineering Geology, 1979, 13 (1/2/3/4): 233-246.
- [19] Ma Wei, Wang Dayan. Mechanics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [20] Lai Yuanming, Xu Xiangtian, Dong Yuanhong, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6-18.
- [21] Ling Xianzhang, Li Qionglin, Wang Lina, et al. Stiffness and damping ratio evolution of frozen clays under long-term low-level repeated cyclic loading: experimental evidence and evolution model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 45-54.
- [22] Zhang De, Li Quanming, Liu Enlong, et al. Dynamic properties of frozen silty soils with different coarse-grained contents subjected to cyclic triaxial loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 157: 64-85.
- [23] Liu Enlong, Lai Yuanming, Liao Mengke, et al. Fatigue and

- damage properties of frozen silty sand samples subjected to cyclic triaxial loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(12): 1939-1951.
- [24] Zhao Yanhu, Lai Yuanming, Pei Wansheng, et al. An anisotropic bounding surface elastoplastic constitutive model for frozen sulfate saline silty clay under cyclic loading[J]. International Journal of Plasticity, 2020, 129: 102668.
- [25] Xu Xiangtian, Zhang Weidong, Fan Caixia, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(4): 925-941.
- [26] Fan Caixia, Zhang Weidong, Lai Ying, et al. Mechanical behaviors of frozen clay under dynamic cyclic loadings with freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 181: 103184.
- [27] Mu Yanhu, Zhu Xinyi, Yue Pan, et al. Monitoring investigation on winter freezing-thawing of dam core wall soils in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 756-763. [穆彦虎, 朱忻怡, 岳攀, 等. 寒区大坝心墙土料冬季冻融与防控监测[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 756-763.]
- [28] Jiao Guide. Dynamic characteristics of warm frozen soils under long-term cyclic loading[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011. [焦贵德. 长期循环荷载下高温冻土的动力特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.]
- [29] Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294. [郑郢, 马巍, 郅慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.]

Influence of the freeze-thaw cycles on dynamic mechanical properties of frozen mixed soil

WANG Dan^{1,3}, LIU Enlong^{1,2}, YANG Chengsong¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the dynamic properties (including the dynamic deformation and dynamic strength) of frozen mixed soils subjected to the freeze-thaw cycles, a series of cyclic dynamic experiments were conducted through a cryogenic triaxial apparatus. With the variation of freeze-thaw cycles, a conspicuous influence on the dynamic stress-strain behaviors, volumetric strain curves, hysteresis loop, accumulative axial strain, dynamic resilient modulus, residual deformation, and dynamic strength of frozen mixed soil was analyzed. The results show that: (1) With the increase of the freeze-thaw cycles, the dynamic stress-strain curves and dynamic volumetric strain curves of frozen mixed soil gradually become looser, and the number of failures decreases linearly; (2) The action of freeze-thaw influences the variation of the hysteresis loop, the accumulative axial strain, the dynamic resilient modulus, and the residual deformation of frozen mixed soil, leading an unacceptable deformation; (3) The dynamic resilience modulus and the dynamic strength of frozen mixed soil are reduced with the number of freeze-thaw cycles increased.

Key words: frozen mixed soil; freeze-thaw cycle; dynamic triaxial test; dynamic mechanical properties

(责任编辑: 李国玉)