



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405582

引用格式:王振华,王泽成,李栋伟,等.基于冻融循环作用下寒区路基土特性与力学响应[J].科学技术与工程,2025,25(20):8666-8673.
Wang Zhenhua, Wang Zecheng, Li Dongwei, et al. Characteristics and mechanical response of subgrade soil in cold region based on freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8666-8673.

交通运输

基于冻融循环作用下寒区路基土特性与力学响应

王振华¹, 王泽成^{1*}, 李栋伟², 贾志文¹

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 南昌 330013; 2. 大连大学建筑工程学院, 大连 116622)

摘要 随着寒区铁路网线的迅速发展,铁路路基病害问题频发。为探讨寒区路基土的冻融特性及力学特性,通过实验手段,系统研究不同含水率、冻结温度和冻融循环次数对路基土冻融特性以及力学特性的影响。实验结果表明:随着含水率的增加、冻结温度的降低以及冻融循环次数增加,土样的冻胀率及融沉系数均一直增加。初始含水率越大及冻结温度越高,水分迁移越明显。随着冻融循环次数增加土样上部水分逐渐减少,下部水分逐渐增加。初始含水率为 8%、10%、12%、14% 时其结冰温度分别为 -1.96、-1.89、-2.17、-2.06 °C,初始含水率为 12% 时其结冰温度最低。随着含水率增加,其强度变化范围为 3.63~6.15 MPa;随着冻结温度降低,其强度变化范围为 3.26~6.05 MPa;随着冻融循环次数的增加,其强度变化范围为 4.49~3.68 MPa。研究成果对于保障道路工程的稳定性和安全性具有重要意义。

关键词 冻融循环;寒区;铁路;路基;力学响应

中图法分类号 U213.1⁺4; 文献标志码 A

Characteristics and Mechanical Response of Subgrade Soil in Cold Region Based on Freeze-thaw Cycles

WANG Zhen-hua¹, WANG Ze-cheng^{1*}, LI Dong-wei², JIA Zhi-wen¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China)

[Abstract] With the rapid development of railway networks in cold regions, frequent subgrade diseases are observed. To investigate the freeze-thaw characteristics and mechanical properties of subgrade soils in cold regions, a series of laboratory tests were conducted. The effects of moisture content, freezing temperature, and freeze-thaw cycles on soil behavior were systematically investigated. The experimental results indicate that the frost heave ratio and thaw settlement coefficient increase consistently with higher moisture content, lower freezing temperatures, and more freeze-thaw cycles. More pronounced moisture migration is observed under conditions of higher initial moisture content and higher freezing temperatures. The upper part of soil samples shows gradual moisture reduction while the lower part exhibits moisture accumulation with increasing freeze-thaw cycles. The freezing temperatures are measured as -1.96, -1.89, -2.17, -2.06 °C for initial moisture contents of 8%, 10%, 12%, and 14% respectively, with the lowest freezing temperature occurring at 12% moisture content. The strength variation ranges are determined as 3.63~6.15 MPa with increasing moisture content, 3.26~6.05 MPa with decreasing freezing temperatures, and 4.49~3.68 MPa with increasing freeze-thaw cycles. These findings are considered significant for ensuring the stability and safety of transportation infrastructure in cold regions.

[Keywords] freeze-thaw cycles; cold region; railway; roadbed; mechanical response

中国经济迅速发展,人民的出行方式得到极大改善。随着中国路网建设不断推进,交通基础设施

建设的步伐也在不断加快。特别是在铁路领域,路网建设的持续推进极大地提升了中国交通运输的

收稿日期:2024-07-25; 修订日期:2025-04-12

基金项目:国家自然科学基金(42061011,41977236);江西省重点研发计划(20223BBG71W01,20232BBE50025);江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-B209);东华理工大学博士启动基金(DHBK2023014)

第一作者:王振华(1984—),女,汉族,江苏泰州人,博士,副教授。研究方向:土木工程建造与管理。E-mail:zhz200802@163.com。

*通信作者:王泽成(1995—),男,汉族,安徽宿州人,博士研究生。研究方向:寒区岩土工程。E-mail:zawang1810@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

效率和便利性,与此同时,寒区铁路建设也取得了质的飞跃^[1-2]。

在全球气候变化加剧与交通基础设施迅速发展的背景下,寒区铁路工程建设与养护面临的挑战日益严峻。特别是在中国北方及西部广袤地区,高寒气候下的路基土体频繁经历冻融循环,对路基的稳定性和耐久性构成显著威胁^[3-4]。冻融作用是寒区路基土体面临的主要挑战之一,在寒冷季节,土体中的水分结冰膨胀,导致体积增大、结构疏松。而在温暖季节,冰体融化后,土体中水分重新分布^[5],从而影响其强度和稳定性。这种循环不仅影响土体的物理结构,还改变其力学特性,对铁路安全构成潜在威胁^[6-7]。

针对这一问题,中外学者开展了一系列的研究工作^[8-10]。杨昊^[11]通过试验研究及数值模拟等方式和手段,对兰新高铁门源至浩门段线路冻胀特性及其规律进行研究。分析兰新高铁路基冻胀机理以及影响冻胀发展的因素,总结分析路基冻胀变形随着温度的变化规律。李长雨等^[12]通过测试破坏动应力比,分析不同围压、不同冻融循环次数和不同加载频率条件下铁尾矿砂改良土破坏特性的变化规律、衰减趋势和影响因素。吴永煤等^[13]开展辽宁阜新地区季冻区路基土体的冻融循环和三轴压缩实验,研究不同含水量、围压和冻融循环条件下路基土体弹性性质的演变规律,构建其能量损伤演变模型,揭示路基土体在冻融作用下的破坏机理。Zhou等^[14]进行相关试验研究冻融循环次数和冻结温度对路基土动态响应的影响,得出随着冻融循环次数的增加,动态剪切模量(阻尼比)的曲线水平首先降低(增加),然后在较小的应变范围内保持大致稳定,在3个冻结低温下,动态剪切模量(阻尼比)的临界循环次数是不同的等结果。崔宏环等^[15]针对两种相变材料,各采用3种不同的配比制备试样,分别进行击实、无侧限抗压强度以及动三轴试验,并分析相变材料配比、冻融循环次数对改良黄土物理力学特性的影响。曹金生^[16]通过物理力学试验、微观测试分析及冻融循环试验等对改良黄土的力学特性、变形特性及抗冻融性能进行研究,并通过有限元软件对煤气化渣改良黄土路基的冻融特性进行数值模拟。Liu等^[17]通过各向同性等温冻融试验研究了不同黏土含量和冰点冻结温度对土壤冻融变形特性的影响,并通过核磁共振和X射线表征了土壤结构演变。程卓等^[18]通过对不同冻融次数、含水率、粉煤灰含量因素下的无侧限抗压及三轴剪切实验,研究冻融循环条件下,土的应力-应变曲线、无侧限压缩强度、黏聚力及内摩擦角等参数的变

化规律。Luo等^[19]探讨了相变材料对黄土机械性能的影响,并探讨了其在冻融循环作用下稳定黄土的机理。杨玉伟^[20]对取自石太客专线路基的砂卵石地层进行了冻胀融沉特性试验,通过不同干密度条件下的测试,发现饱水砂卵石在冻融过程中的温度场、冻胀量和融沉量均受干密度影响,且随着干密度的增大而减小。

综上所述,由于寒区气候条件的特殊性和复杂性,以及路基土体的多样性。土体冻胀融沉特性的研究主要集中在无载条件下的黏土、粉土等细粒土试验研究,但上述方法测得的冻胀率普遍大于实际工程有载冻胀率。关于冻融作用对路基土冻融特性以及力学特性综合评价与相关机理还待深入研究。鉴于此,针对寒区铁路路基土冻融特性及力学特性开展综合性的研究。通过室内试验,系统研究冻融循环、含水率、冻结温度对路基土冻胀融沉的影响规律、水分的迁移规律、温度的变化规律以及力学响应规律的影响。研究成果可为寒区铁路工程的设计、施工和养护提供科学依据和技术支持。

1 试验内容及方案

1.1 试验材料及仪器

试验用土为西部某寒区铁路路基土,土体基本物理参数如表1所示。冻融试验所采用的仪器TMS9012型冻融试验机,如图1所示,温度控制范围为 $-60 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$,力学试验所采用的仪器为MTS170.5型疲劳试验机,如图2所示。根据现场取土环境,反映寒区工程实际中土体真实状态,取含水率为8%、10%、12%和14%,冻结温度为 -5 、 -10 、 $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冻融循环次数为1、3、5、7,试样压实度取为 1.93 g/cm^3 。

表1 试验土样物理参数

Table 1 Physical parameters of test soil samples

土样	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水 率/%	天然含 水率/%	比重	天然孔 隙比 e
粉质砂土	1.86	10.9	7.5	2.63	0.45

1.2 试样制备

试样制备参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),将粉质砂土在 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘干机中烘干24 h后取出碾碎,然后过2 mm筛去除土里的杂质,保持土壤干燥以待后用。通过台秤测量试验所需的土壤和水,进行混合制样。具体步骤如下。

(1) 土样准备。计算所需的干土与纯水质量,按条件配成不同含水率的试验用土。

(2) 土样制作。分3层击实法制取试样,制成(冻融 $\Phi 100 \times 120 \text{ mm}$ 、力学 $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$)的试样。



图1 TMS9012 型恒温环境箱
Fig.1 TMS9012 constant temperature environment box



图2 MTS170.5 型疲劳试验机
Fig.2 MTS170.5 fatigue testing machine

(3)装置土样。将固结后的试样放入试验箱内固定,连接温度及水分传感器。

(4)进行试验。开启试验装置,连接数据采集系统,开始试验。

1.3 试验原理及方案

冻胀率的计算公式为

$$\eta_f = \frac{\Delta h_f}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: Δh_f 为冻胀位移量,mm; h_0 为试样原高度,mm。

融沉系数的计算公式为

$$a_{f0} = \frac{\Delta h_{f0}}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: Δh_{f0} 为融沉位移量,mm。

处理测得的数据,计算得到不同条件下粉质砂土的冻胀率与融沉系数。绘制二者的关系曲线。试验方案如表2所示。

表2 冻融及力学试验方案

Table 2 Freeze-thaw and mechanical test scheme

试验编号	含水率/%	冻结温度/℃	冻融循环/次
HS-1	8	-10	1
HS-2	10	-10	1
HS-3	12	-10	1
DW-1	14	-10	1
DW-2	10	-5	1
DW-3	10	-10	1
DW-4	10	-15	1
DR-1	10	-10	1
DR-2	10	-10	3
DR-3	10	-10	5
DR-4	10	-10	7

2 试验结果

2.1 冻融特性研究

图3为不同初始含水率(6%、8%、10%、12%)条件下,冻胀率融沉系数与含水率关系图。图4为冻融试验后的水分重分布图。

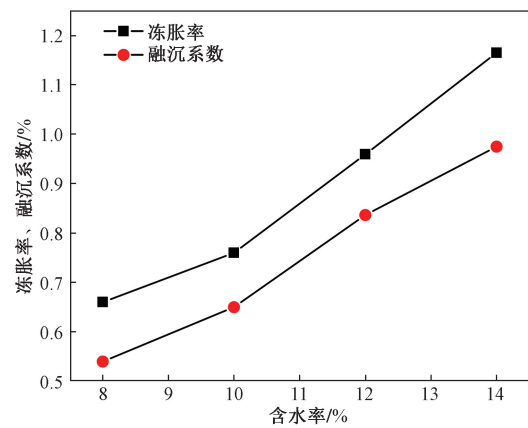


图3 冻胀率融沉系数与含水率关系图

Fig.3 Relationship between frost heave rate thaw settlement coefficient and water content

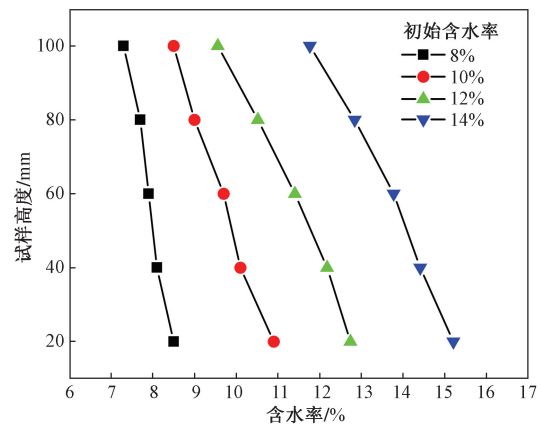


图4 水分迁移与含水率关系图

Fig.4 Relationship between water migration and water content

从图3可以看出,在相同的冻结温度下,保持密度不变,随着含水率的增加,土样的冻胀率(融沉系数)一直增加,且在初始含水率10%后增加速度加快。这是因为水在冻结过程中会相变成冰,而冰的体积比水大,因此会填充土体的孔隙并导致土体体积膨胀。可以看出,存在一个最佳含水率10%,这是影响土样冻胀率(融沉系数)变化趋势的分界点。在最佳含水率之前,冻胀率(融沉系数)随含水率增加的速度较慢,而超过最佳含水率后,冻胀率(融沉系数)增加的速度加快。初始含水率每增长1%,冻胀率平均增长了8%,融沉系数平均增长了6.8%。在不同的初始含水率条件下,试样的冻胀率均大于融沉系数。只有在初始含水率为14%时,冻胀率大于1此时属于弱冻胀,其他初始含水率条件下均为不冻胀。这解释了路基必须要及时排水的原因,由此可以看出含水率是影响冻胀率的重要因素。

从图4可以看出,在冻融过程中,具有不同初始含水量的土样在冻融过程中的含水量变化规律是相同的,即接近冷端部的含水量有所增加,而接近热端部的含水量有所降低。随着初始含水量的增加,水分在土体中的传输变得更加显著。这是由于冻土在冻结时,由于冻结锋朝向暖端移动,在土体中形成负压,使得水分从暖端向冷端处积聚,从而导致了土样两端水分含量的不同。

不同冻结温度(-5、-10、-15℃)条件下,冻胀率融沉系数与冻结温度关系情况,如图5所示。

从图5可以看出,在冻结开始之前,土体内的水分通常以液态形式存在,分布相对均匀,冻结过程中土壤水分的迁移方向是从暖端向冷端迁移。在相同的初始含水率条件下,保持密度不变,随着冻结温度的降低,土样的冻胀率(融沉系数)会一直增加,且在-10℃后增加速度加快。冻结温度每降低

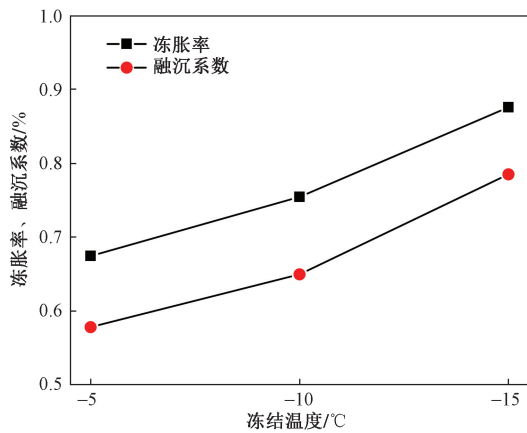


图5 冻胀率融沉系数与冻结温度关系图

Fig. 5 Relationship between frost heave rate thaw settlement coefficient and freezing temperature

1℃,冻胀率平均增长了2%,融沉系数平均增长了2.2%。

水分迁移与冻结温度关系图如图6所示。可以看出,不同冻结温度下的试样中水分变化规律基本相似,试样靠近冷端部位含水率略有增大,靠近暖端部位含水率略有减低。冻结温度越高,水分迁移越明显。这是冻结温度较高时,土中的水分会慢慢冻结成冰,而冻结温度较低时,水分会发生速冻,阻碍了此时的水分迁移。

图7为不同冻融循环(1、3、5、7次)条件下,冻胀率融沉系数与冻融循环次数关系图。可以看出,在相同的初始含水率条件下,保持密度不变,随着冻融循环次数的增加,土样的冻胀率会一直增大。这主要是由于土壤中的水分在冻结过程中会发生相变,产生体积变化,导致土壤体积膨胀。随着冻融循环次数的增加,土壤中的水分不断向冻结锋面附近迁移并聚集,进一步加剧了冻胀现象。随着冻

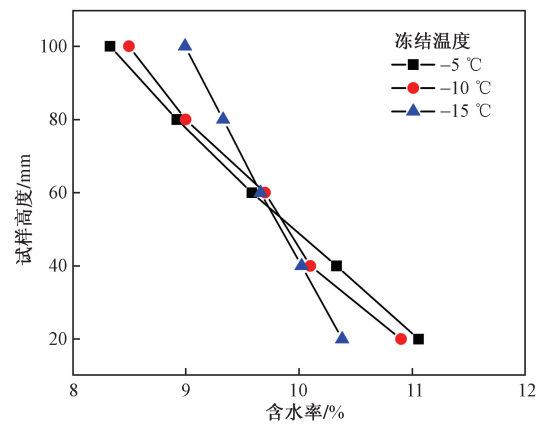


图6 水分迁移与冻结温度关系图

Fig. 6 Relationship between water migration and freezing temperature

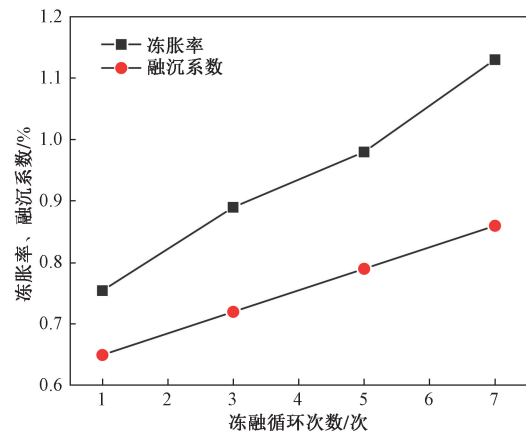


图7 冻胀率融沉系数与冻融循环次数关系图

Fig. 7 Relationship between frost heave rate thaw settlement coefficient and freeze-thaw cycle times

融循环次数的增加,土壤的融沉系数也会逐渐增大。这主要是因为冻胀量的增大使土颗粒间的孔隙变大,在融化升温时,有较多的大孔隙为融沉提供恢复变形的空间。冻融循环每增加1次,冻胀率平均增长了6.3%,融沉系数平均增长了2.1%。水分迁移与冻融循环次数关系图如图8所示。可以看出,随着冻融循环次数的增加,水分在土体中迁移规律相似,发生显著变化。随着冻融循环次数增加土样上部水分逐渐减少,下部水分逐渐增加,这是因为每次冻融循环都会影响土体的渗透性和持水性,使得水分在土体中更容易输运和分布,都会让水分进行重新分布,可见冻融循环对于土体中水分重分布影响也比较大。

图9为10%初始含水率试样,在5℃环境箱内养护1h后,以-10℃进行冻结的试样不同高度温度变化曲线。可以看出,每个高度的温度变化曲线规律基本一致。温度曲线可以划分为6个阶段,其中,冻结过程可分为缓慢降温、快速降温、温度稳定3个阶段,融化过程可分为急速升温、缓速升温、温度稳定3个阶段。试样距离冷端越近的部位,温度变化越明显,降温速率越快,融化时升温速率越慢。

对不同初始含水率下的土体进行结冰温度测量试验。把4个不同初始含水率的土样放入铝盒中,轻轻压实,用保鲜膜把铝盒覆盖,插入传感器。让其在5℃条件下保存3h,再对其进行-10℃降温6h,根据时间和温度作出温度全过程曲线如图10所示。对图10中的B-C-D段进行放大,得到不同初始含水率下的土体结冰温度如图11所示。

对图10不同初始含水率下的土体温度变化曲线进行分段。可以看出,不同初始含水率温度变化曲线基本一致,A-B段,随着时间的增加,不同土体的温度快速降低;B-C段,土样温度都略有回升,这

是因为水的相变潜热产生,水相变成冰,放出热量导致温度略有上升;C-D段,温度平稳;D-E段,温度继续快速下降;E-F段,温度继续下降但是下降速率减小。

对于C-D段温度曲线此时基本平行于x轴,温

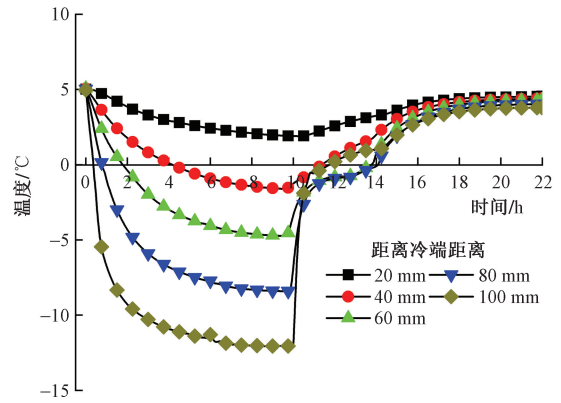


图9 试样不同高度温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation curves at different heights of sample

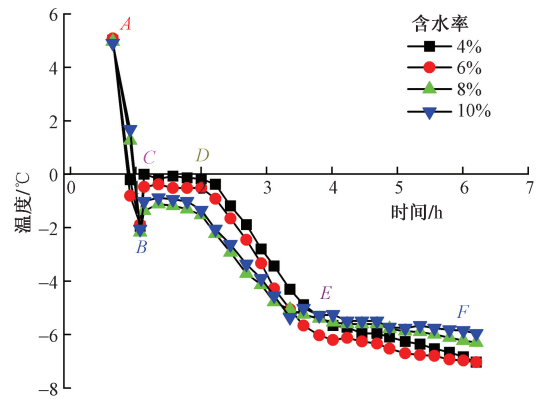


图10 不同初始含水率下的土体温度变化

Fig. 10 Soil temperature change under different initial water content

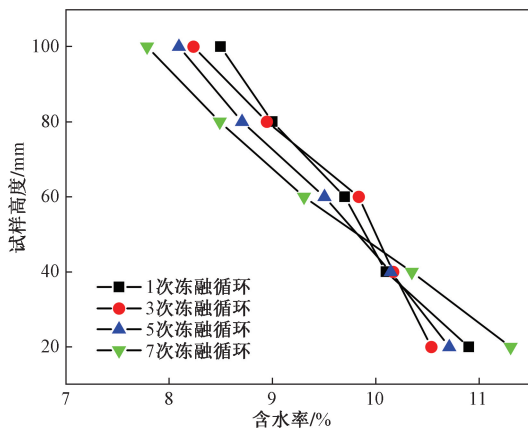


图8 水分迁移与冻融循环次数关系图

Fig. 8 Relationship between water migration and freeze-thaw cycles

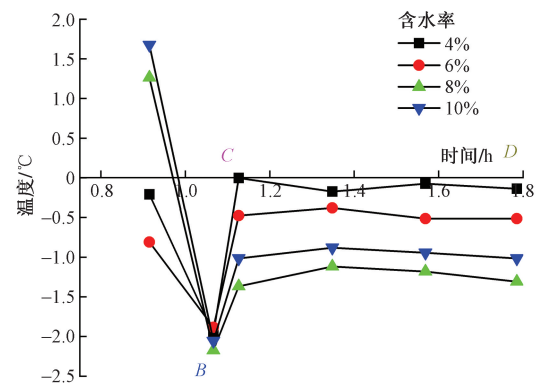


图11 不同初始含水率下的土体结冰温度

Fig. 11 Soil freezing temperature under different initial water content

度保持稳定,此时的温度就是结冰温度。因为冰是晶体,水在结冰过程中,不断向外释放能量,分子平均动能不变,分子间的距离变大,分子势能减小,水的内能减小,所以水在结冰的过程中温度保持不变。从图 11 中可以看出,相变潜热过程从冻结开始后 1.1 h 一直延续到 1.8 h,持续 42 min。初始含水率为 8% 时其结冰温度为 $-1.96\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始含水率为 10% 时其结冰温度为 $-1.89\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始含水率为 12% 时其结冰温度为 $-2.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始含水率为 14% 时其结冰温度为 $-2.06\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始含水率为 12% 时其结冰温度最低。

2.2 力学特性研究

按照表 2 中的试验方案,对路基土进行不同含水率、冻结温度以及冻融循环下的三轴剪切试验。为了模拟路基土的真实工况,三轴试验的围压取定量 0.2 MPa,路基土土试样偏应力加载曲线如图 12 ~ 图 14 所示。

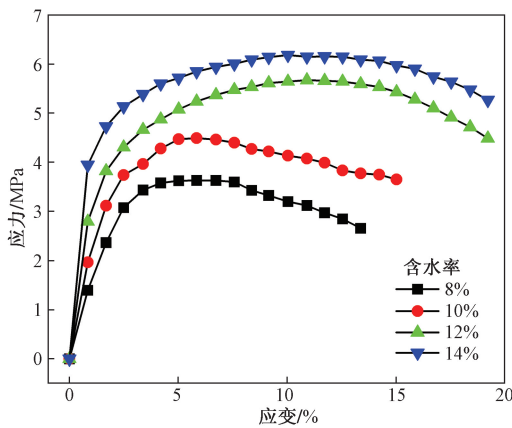


图 12 不同含水率下路基土三轴剪切曲线
Fig. 12 Triaxial shear curve of subgrade soil under different water content

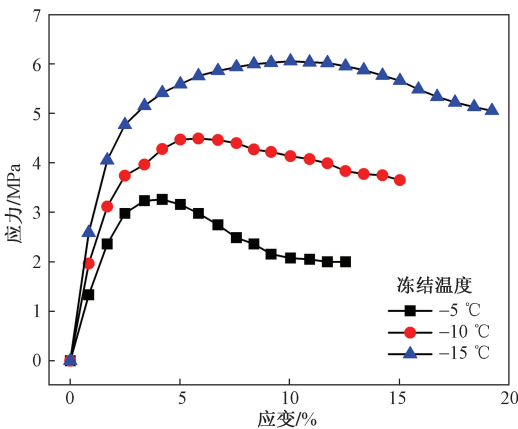


图 13 不同冻结温度下路基土三轴剪切曲线
Fig. 13 Triaxial shear curves of subgrade soil under different freezing temperature

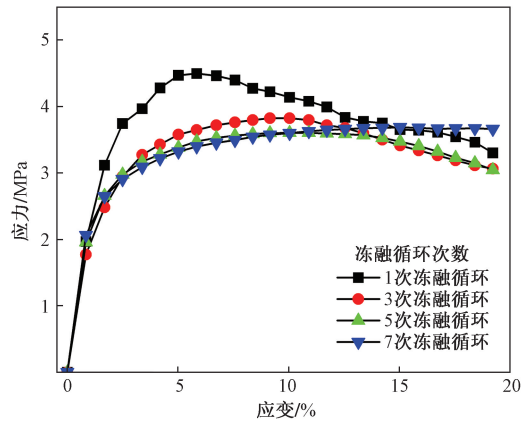


图 14 不同冻融循环次数下路基土三轴剪切曲线
Fig. 14 Triaxial shear curve of subgrade soil under different freeze-thaw cycles

如图 12 所示,含水率为 8% ~ 14% 时,轴向应力随应变增大而迅速减小,呈现出明显的脆性破坏模式,即应变软化型。在初始阶段,由于土体在初始受力时先以弹性变形为主,然后再随应变增大而屈服。随后又会产生一个转折点,这时不但会产生弹性变形,而且会产生不可挽回的塑性变形,直至破坏。随着含水率增加,路基土的强度逐渐增加,但增加速率减小,8% ~ 14% 含水率间其强度变化范围为 3.63 ~ 6.15 MPa。

从图 13 可以看出,冻结温度对路基土强度影响较大,应力应变曲线都呈应变软化型曲线, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结温度间其强度变化范围为 3.26 ~ 6.05 MPa。随着土体冻结温度的降低,冻土中未冻水含量逐渐减少,含冰量增加,使得冰与土颗粒之间的胶结作用增强,这种约束作用限制了土颗粒的运动和变形,从而使得土体在受到外力作用时更加稳定,提高了土体的整体强度。

从图 14 可以看出,随着冻融循环次数的增加,土体强度逐渐减小,且减小速率变小。这是因为冻融循环会导致土中毛细孔隙中的水分结冰形成冰晶,随着冰晶的扩大,它会破坏土体颗粒结构,从而降低土体的抗剪强度。不同冻融循环次数下,曲线都存在明显峰点值,为应力软化型曲线,冻融 7 次时,曲线没有明显峰点值,为应力硬化型曲线。随着冻融循环次数增加,路基土强度逐渐减小,其强度变化范围为 4.49 ~ 3.68 MPa。

3 结论

通过实验手段,系统研究不同含水率、冻结温度和冻融循环次数对路基土冻融特性和力学响应的影响,得出以下主要结论。

(1) 随着含水率的增加、冻结温度的降低以及

冻融循环次数增加,土样的冻胀率(融沉系数)均一直增加。初始含水率每增长1%,冻胀率平均增长了8%,融沉系数平均增长了6.8%。冻结温度每降低1℃,冻胀率平均增长了2%,融沉系数平均增长了2.2%。冻融循环每增加1次,冻胀率平均增长了6.3%,融沉系数平均增长了2.1%。

(2)初始含水率越大及冻结温度越高,水分迁移越明显。试样靠近冷端部位含水率略有增大,靠近暖端部位含水率略有减低。随着冻融循环次数增加土样上部水分逐渐减少,下部水分逐渐增加。

(3)不同初始含水率的土样,发生相变潜热过程是从冻结开始后1.1 h一直延续到1.8 h。初始含水率为8%、10%、12%、14%时其结冰温度分别为-1.96、-1.89、-2.17、-2.06℃,初始含水率为12%时其结冰温度最低。

(4)试验范围内,随着含水率增加,路基土的强度逐渐增加,其强度变化范围为3.63~6.15 MPa;随着冻结温度降低,路基土的强度逐渐增加,其强度变化范围为3.26~6.05 MPa;随着冻融循环次数的增加,路基土强度逐渐减小,其强度变化范围为4.49~3.68 MPa。

参 考 文 献

- [1] 李玉生,刘润喜,赵伟,等.某公路冻害室内冻融试验分析[J].路基工程,2022(2):51-55.
Li Yusheng, Liu Runxi, Zhao Wei, et al. Analysis of indoor freezing and thawing tests of freezing damage on a highway[J]. Subgrade Engineering, 2022(2): 51-55.
- [2] 覃星源.基于神经网络融合模型的季冻区路基变形预测及路面附加效应分析[D].长春:吉林大学,2024.
Qin Xingyuan. Prediction of subgrade deformation based on neural network fusion model and pavement additional effect analysis in seasonal frozen area[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [3] 王泽成,李栋伟,秦子鹏,等.季节冻土区纤维改良路基土冻胀融沉特性研究[J].森林工程,2023,39(4):145-154.
Wang Zecheng, Li Dongwei, Qin Zipeng, et al. Study on frost heaving and thawing settlement characteristics of fiber-improved subgrade soil in seasonal frozen soil region[J]. Forest Engineering, 2023, 39(4): 145-154.
- [4] 张云龙,贾强,王静,等.冻融对水泥改良路基土力学特性影响研究[J].吉林建筑大学学报,2024,41(1):39-42.
Zhang Yunlong, Jia Qiang, Wang Jing, et al. Study on the influence of freeze-thaw on the mechanical characteristics of cement improved subgrade soil[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2024, 41(1): 39-42.
- [5] 屈永龙,倪万魁,牛富俊,等.中国寒区粗粒土力学研究现状与进展[J].科学技术与工程,2022,22(8):2979-2992.
Qu Yonglong, Ni Wankui, Niu Fujun, et al. Research status and progress of coarse-grained soil mechanics in cold regions of China[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 2979-2992.
- [6] 魏密,李雪芹,余承喜.冻融黏土动态回弹模量演变规律及预估模型[J].长江科学院院报,2022,39(11):102-106.
Wei Mi, Li Xueqin, Yu Chengxi. Evolution rule and prediction model for dynamic resilient modulus of clay under cyclic freezing-thawing[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(11): 102-106.
- [7] 唐鑫,张吾渝,何蓓,等.冻融循环作用下黄土动态回弹模量研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):456-464,485.
Tang Xin, Zhang Wuyu, He Pei, et al. Study on dynamic resilience modulus of loess under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 456-464, 485.
- [8] 朱杰,唐文铨,高珍珍.注浆粉质黏土冻胀融沉特性:以福州地区四号线地铁为例[J].科学技术与工程,2023,23(30):13067-13077.
Zhu Jie, Tang Wencheng, Gao Zhenzhen. Freeze-heave and thawing characteristics of grouting silty clay: take Fuzhou Metro Line 4 as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 13067-13077.
- [9] 张晋勋,宋永威,杨昊,等.荷载及细粒土含量对饱和砂卵石冻胀融沉影响研究[J].岩土力学,2022,43(S1):213-221.
Zhang Jinxun, Song Yongwei, Yang Hao, et al. Influences of load and fine soil content on frost heave and thawing settlement properties of sandy gravel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 213-221.
- [10] Ye Z, Wang Q, Fang J, et al. Study on physical and mechanical properties of high-grade highway subgrade slate in permafrost region under freeze-thaw cycles[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 19209.
- [11] 杨昊.季节冻土区高速铁路路基冻胀机理及规律研究[D].兰州:兰州理工大学,2022.
Yang Hao. Research on frost heave characteristics of high-speed railway subgrade in seasonally frozen soil area[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [12] 李长雨,徐明杨,武晓伟,等.季冻区铁尾矿砂改良路基土冻强度特性分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(4):438-443.
Li Changyu, Xu Mingyang, Wu Xiaowei, et al. Analysis of dynamic strength characteristics of iron tailings sand improved road base in seasonal frost zone[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2023, 42(4): 438-443.
- [13] 吴永煤,安征,李永靖,等.季冻区路基土的能量损伤演化模型研究[J].路基工程,2022(3):57-60.
Wu Yongmei, An Zheng, Li Yongjing, et al. Study on energy damage evolution model of frozen soil subgrade in seasonally frozen area[J]. Subgrade Engineering, 2022(3): 57-60.
- [14] Zhou Z, Li G, Shen M, et al. Dynamic responses of frozen subgrade soil exposed to freeze-thaw cycles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 152: 107010.
- [15] 崔宏环,闫利,赵嘉.高速铁路水泥粉煤灰填料冻融特性研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):2785-2793.
Cui Honghuan, Yan Li, Zhao Jia. Study on freeze-thaw characteristics of cement fly ash filler for high-speed railway subgrade[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10): 2785-2793.
- [16] 曹金生.季冻区煤气化渣改良黄土路基填土的力学特性与冻

- 融特性研究[D]. 银川:宁夏大学, 2023.
- Cao Jinsheng. Study on the mechanical properties and freeze-thaw characteristics of coal gasification slag improved loess roadbed filling in seasonally frozen region[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [17] Liu J, Xu H, Tao Y, et al. Effects of clay content and subfreezing temperature on the freeze-thaw deformation properties of clayey soils[J]. *Catena*, 2024, 239: 107916.
- [18] 程卓, 崔高航, 高原昊, 等. 季冻区粉煤灰加固路基土力学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(11): 3854-3864, 3875.
- Cheng Zhuo, Cui Gaochang, Gao Yuanhao, et al. Mechanical properties of fly ash reinforced subgrade soil in seasonally frozen area[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(11): 3854-3864, 3875.
- [19] Luo Z, Zheng Y, Zhang X, et al. Effect of phase change materials on mechanical properties of stabilized loess subgrade subjected to freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(8): 04023217.
- [20] 杨玉伟. 石太客专路基冻胀融沉特性试验与冻害控制措施[J]. *铁道技术监督*, 2023, 51(6): 37-42.
- Yang Yuwei. Frost heave and thaw settlement characteristics test and frost damage control measures of Shitai passenger dedicated roadbed[J]. *Railway Quality Control*, 2023, 51(6): 37-42.