

双向冻融条件下粉质黏土的水热特征研究

Hydrothermal Characteristics of Silt Clay under Bidirectional Freeze – thaw Conditions

贾岚茹^{1,3}, 宋宏芳^{1,3}, 王天亮^{1,2,3}

- (1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘 要: 针对季冻区涵洞顶部路基土体的冻融情况, 开展室内冻融试验, 分析土体内部温度、水分迁移及冻结深度的演变特征。结果表明: 双向冻融时, 冻结融化交替, 温度波动大, 分布不均, 呈非线性分布, 特别在中下部形成一条明显的冷温带; 经双向冻融循环后, 试件的含水率分布从上到下呈现出“增大 – 减小 – 增大”的变化规律, 且随着初始含水率的增加, 这种变化趋势愈发明显。在相同冷源温度条件下, 有温差的双向冻结效率显著高于单向冻结, 其上部冻结深度约为单向冻结上部冻结深度的 1.7 倍, 且该比值与初始含水率呈负相关关系。研究结果为季冻区涵洞顶填土冻融防控提供重要指导作用。

关键词: 粉质黏土; 单/双向冻融; 温度演变; 水分迁移; 冻结深度

中图分类号: U24

文献标志码: A

文章编号: 1005–8249 (2025) 06–0081–07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005–8249.2025.06.015

JIA Lanru^{1,3}, SONG Hongfang^{1,3}, WANG Tianliang^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To investigate the freeze – thaw behavior of subgrade soil at the culvert top in seasonal frozen regions, laboratory freeze – thaw experiments were conducted. The evolution characteristics of internal temperature, moisture migration, and freezing depth within the soil were systematically analyzed. During bidirectional freeze and thaw, the alternation of freeze and thaw leads to large temperature fluctuations and uneven distribution, which is nonlinear, especially forming a distinct cold belt in the middle and lower parts. After the bidirectional freeze – thaw cycles, the moisture content distribution of the samples shows a pattern of "increase – decrease – increase" from top to bottom, and this trend becomes more pronounced with the increase of the initial moisture content. Under the same cold – end temperature conditions, the bidirectional freezing with a temperature difference is more efficient than the unidirectional freezing. The freezing depth in the upper part is about 1.7 times that of the unidirectional

基金项目: 国家自然科学基金 (51978426, 52378453, 52408485)。

作者简介: 贾岚茹 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 道路与铁道工程。

收稿日期: 2025–02–11

道桥技术

freezing, and this ratio is negatively correlated with the initial moisture content. The research results provide important guidance for the prevention and control of freeze – thaw of the fill soil on the top of culverts in seasonal frozen soil regions.

Key words: silt clay; unidirectional/bidirectional freeze – thaw; temperature evolution; water migration; freeze depth

0 引言

反复冻融循环作用会产生强大的破坏力，对土体的物理性质、结构以及周边环境产生显著影响。在工程实践中，涵洞洞顶填土同时受到上下两端温度的影响，从而形成双向冻融现象^[1-2]。这种现象可能导致土体内部受力不均，进而加剧结构变形和失稳风险^[3]。因此，深入研究土体双向冻融特征，揭示其温度变化规律以及土体内部水分迁移的影响，对于保障寒冷地区基础设施的稳定性具有重要的理论价值和现实指导意义。

近年来，国内外学者对土体冻胀现象开展了系统性研究，王天亮等^[4]研究了人工地层冻结法中粉质黏土地层的力学性能演化规律，重点探讨了冷冻温度、含水量和围压对人工冻结粉质黏土强度和冻胀变形的影响；且有些学者^[5-6]认为冻胀的成因是原位冻结与水分迁移的共同作用。Fu 等^[7]和温智等^[8]评述了冻土水分迁移的发展历程、主要进展与现状，探讨了冻土水分迁移的驱动力以及相关的物理原理。而在多年冻土地区，路基的冻结过程则具有明显的双向发展特征，即当地表温度降低时，冻结锋面会自地表向下推进，同时，下卧冻土层则自底部向上冻结，从而形成复杂的双向冻结动态过程^[9]。早期研究已揭示多年冻土区路基的双向冻结机制，胡建华等^[10]通过建立湿热耦合数学模型，并结合数值模拟与试验验证，深入探讨了多年冻土地区路基在双向冻结条件下的温度场和水分迁移规律，为评估路基稳定性提供了理论依据。此外，针对冻土退化层，阴琪翔等^[11]设计了冻融循环装置与改造后的三联固结仪，开展了双向冻结 – 单向融化模式下粉质黏土的融沉与压缩特性试验，揭示了该特殊冻融条件下土体的变形机理。李锐阳等^[12]采用自行研制的多功能冻胀试验机，设计了双向冻结模式下深厚表层黏土冻胀特性的正交试验研究，结果表明影响土体冻胀率的两大主要因素是含水率和外部荷载。李阳等^[13]对重塑黏土开展了单双向冻结试验，得到了双向冻结模式下冻结锋面平均发展速度约为单向冻结

条件3 倍的结论，并得到了双向冻结模式下试件测点温度及冻结锋面的发展随时间变化基本都延纵向对称的规律。此外，也有学者发现季节性冻土区涵洞土体存在同样的双向冻结问题，张梓鸿^[14]利用 Fluent 软件对涵洞在低温环境下的温度场进行数值模拟，探讨了深季节冻土地区路涵过渡段易发生冻胀的原因。

上述研究多针对多年冻土区路基在单次双向冻结条件下的温度场演化、湿热耦合效应及冻胀特性展开分析。然而对于土体在季冻区涵洞工况多次双向冻融过程中的温度变化及水分迁移研究较少，本文以涵洞洞顶填土为研究对象，重点分析在不同含水率、两次单/双向冻融条件下，土体内部温度演变特征以及冻融结束后的水分重分布及冻深情况。研究结果将为该地区铁路涵洞洞顶填土安全性、冻胀病害研究提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自朔黄铁路神池 SK217 + 307 处上行路肩位置，自然状态下呈现深褐色，土体的粒径级配分布如图 1 所示，基本物理性质指标见表 1，属于低液限粉质黏土。

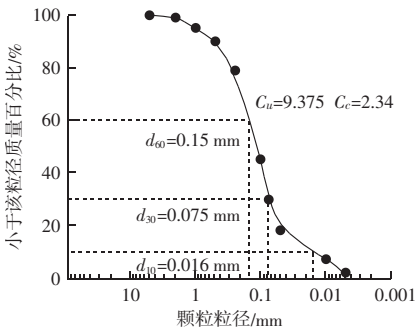


图 1 粒径级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve

表 1 土体物理性质

Table 1 Physical properties of silty clay

液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\gamma_{max}/(g \cdot cm^{-3})$
30.54	18.28	12.26	17.2	1.89

1.2 试验设备

为实现不同冻融方式下粉质黏土冻融特征的研究，采用自主研发的冻融试验系统，设备示意图如图2所示，该试验系统由以下四部分组成：

- (1) 试件为筒高 400 mm、内径 100 mm、外径 140 mm 的亚克力圆筒，沿筒身一侧纵向设置 12 个孔洞用于安装温度传感器，孔洞直径为 5 mm，第一个孔洞位置距离底端 10 mm，其余侧边成孔间距为 30 mm；
- (2) 控温装置由温控范围为 $-40\sim100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、控温精度为 $\pm0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高低温冻融环境试验箱，温度控制范围为 $-30\sim30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、精度为 $\pm0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 NESLAB 型冷浴循环机，上下冷浴盘组成，可实现试件两端试验温度控制；
- (3) 数据采集装置由温度传感器和数据采集模块组成，温度传感器为三线制接插针的 PT100 铂电阻，测温范围为 $-50\sim200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，实时进行温度监测；
- (4) 温度采集仪为 YC1003 数据采集模块，该模块采用标准的 Modbus 通信协议，可以同时精准采集 16 路传感器，测温精准。

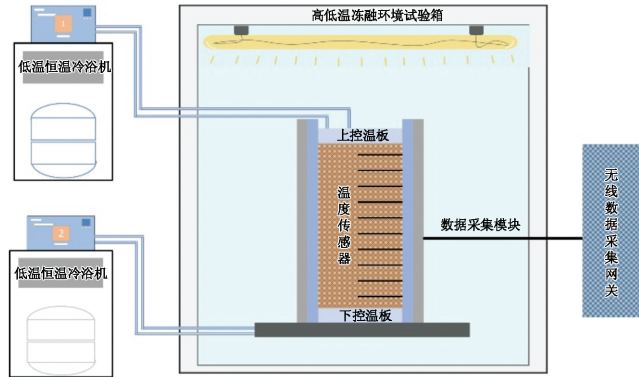


图2 试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental system

1.3 试验方案

选取土体初始含水率、冻融方式（单、双向）为变量，以试验过程中土体的温度变化规律、冻结深度及最终水分作为评估试验结果的关键参数。拟定双向冻结方式冻结融化温差均为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中双向融化阶段设置上端最终融化温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，底端最终融化温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ （分别进行梯度升温，以达到

上暖下冷的状态）。设置冻结时间为 10 h，融化时间为 12 h，试验工况设计见表 2，进行 2 次冻融。

表2 试验工况设计表

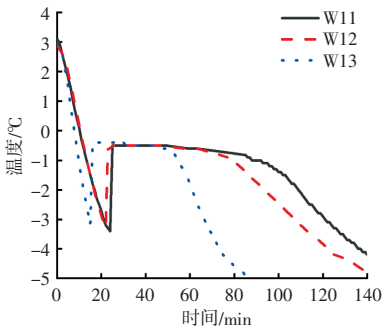
Table 2 Test condition design table

冻融方式	含水率/%	冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$		融化温度/ $^{\circ}\text{C}$	
		顶端	底端	顶端	底端
单向	16	0~10 h: -10	0~10 h: 5	10~13 h: 0	10~22 h: 5
	18	0~10 h: -10	0~10 h: 5	13~16 h: 5	10~22 h: 5
	20	0~10 h: -10	0~10 h: 5	16~19 h: 10	10~22 h: 5
		0~10 h: -10	0~10 h: 5	19~22 h: 15	10~22 h: 5
双向	16	0~10 h: -10	0~10 h: -15	10~13 h: 0	10~13 h: -5
	18	0~10 h: -10	0~10 h: -15	13~16 h: 5	13~16 h: 0
	20	0~10 h: -10	0~10 h: -15	16~19 h: 10	16~19 h: 5
		0~10 h: -10	0~10 h: -15	19~22 h: 15	19~22 h: 10

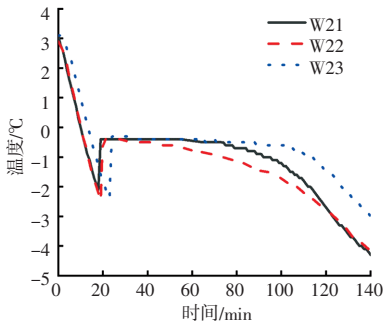
2 试验结果与分析

2.1 冻结温度分析

从图3中可知，不同初始含水率土体冻结温度随时间呈现相似的变化趋势，大致分为4个阶段：过冷阶段、跳跃阶段、稳定阶段及递降阶段^[15]。初始含水率为 16%、18%、20% 的土体冻结温度分别为 -0.37 、 -0.23 、 $-0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，即随着初始含水率的增加，粉质黏土的冻结温度升高，逐渐趋近于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是由于非饱和粉质黏土含水率越高，自由水比例越大。自由水的冻结温度接近于纯水，而束缚水和



(a) $w=16\%$



(b) $w=18\%$

道桥技术

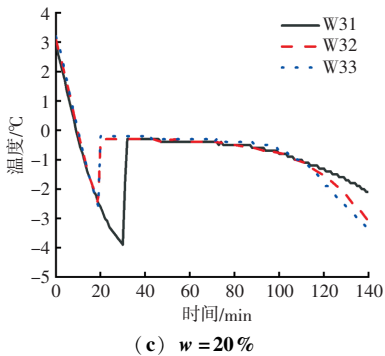


图3 试件冻结温度曲线
Fig.3 Freeze temperature curve of samples

毛细管水的冻结温度较低，因此随着含水率的升高，整体冻结温度也会升高。（其中 W11 ~ W33 为不同含水率的试件）。

2.2 温度时变演化特征

粉质黏土是一种对温度极为敏感的特殊土体，因此在冻融过程中对土体各位置温度的监测至关重要。初始含水率为 20% 的试件在不同冻融条件下温度时变数据如图 4 所示。其中 0 cm 处为试件底端，30 cm 处为试件顶端。

(1) 在单向冻融模式下，土体冻结阶段可分为三个阶段：0~4 h 为快速降温阶段，靠近冷端土体温度迅速下降，降温速率快，温度递减明显；4~8 h 为缓慢降温阶段，土体温度缓慢下降，因冰水相变释放潜热减缓温度变化速率；8~10 h 为稳定阶段，土体温度变化不明显，不同高度处温度保持恒定，仅上层土体冻结。融化阶段每隔 3 h 控温，前 2 h 试件 28 cm 处温度迅速上升后减缓，因顶端温差变大使试件快速吸热；后续阶段正温向下传递，温差变小，试件吸热速率减缓，温度缓慢上升。底端温度恒为 5 °C，附近土体温度变化稳定，融化 12 h 后，试件各位置土体均达到正温，第二次冻融阶段与第一次温度变化趋势相似。

(2) 在双向冻融模式下，冻结时温度逐渐下降，这一过程由冰晶形成和相变潜热释放影响。靠近两冷端的土体在初期（0~4 h）温度快速降低，水分快速冻结形成冰相，并释放潜热抵消部分冷源作用；中期（4~8 h）随着冻结层逐渐向内推进，水分以较慢速率持续冻结，释放潜热进一步减缓了温度下降速率；后期（8~10 h）土体温度趋于稳定，大部分水分已经冻结，剩余水分的冻结和潜热释放逐渐结

束，温度变化主要受外界冷源控制，表现出与单向冻结类似的规律。在中层土体，由于上下两端同时施加冷源，冻结锋面从两端向中间推进，最终在中间区域交汇，土体整体冻结完成。融化初期，土体表层温度快速升高，中层温度却上升缓慢，反映出内部热传导的滞后性，由于中层土体在融化过程中，因长时间受负温滞后效应及上下温差的影响，温度偏低，使得该区域土体难以融化。在融化过程中，土体水分由固态冰转变为液态水时，潜热的吸收成为影响温度变化的主要因素。在两次冻融过程中，温度变化的趋势相似，但第二次冻融过程中，由于第一次融化过程中中部土体温度变化不大，因此整体温度变化幅度略小于第一次。

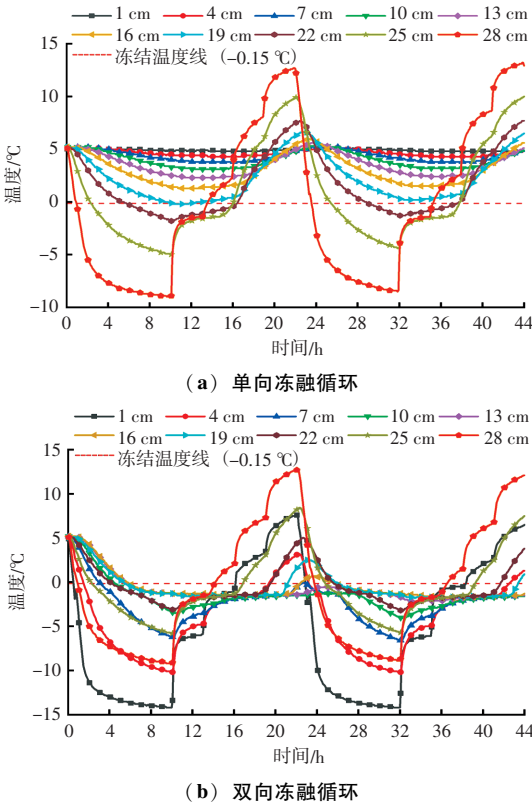


图4 不同冻融条件下土体温度随时间变化曲线
Fig.4 Temperature variation curves of soil with time under different freeze - thaw conditions

2.3 土体全断面温度变化特征

从图 5 中可以看出，单向冻融和双向冻融对土体温度分布的影响存在显著差异。在单向冻融过程中土体的温度变化相对平稳，冻结过程中，土体顶部的温度较低，底部的温度较高。随着融化过程的推进，底部温度逐渐升高并趋于均匀。在单向冻融过

程中，温度变化呈现一定的时间延续性，随着时间的推移，温度分布逐渐稳定，不会出现大幅度的波动。因此，冷区的扩展和融化区域的回升较为均匀，整体温度分布变化也较为线性。

双向冻融过程中温度的变化更加频繁和剧烈。由于冻结和融化交替作用，温度在冻结和融化阶段都出现较大的波动，其中由于试件底部在试验时每个阶段的温度都低于顶部，在土柱的中下部区域形成了一条较为明显的冷温带，且这种冷温情况伴随冻融次数增加扩大化。双向冻融作用下，土体内部的温度分布极不均匀，温度梯度出现频繁的短周期波动，且温度变化的剧烈程度显著高于单向冻融。每次冻融循环都会引起土体内部温度的显著变化，导致温度波动剧烈。在融化阶段，土体顶部与底部的温差变化幅度较大，这种差异并未像单向冻融那样逐渐趋于稳定，而是在交替冻融过程中持续变化，表现为更加剧烈的温差波动。因此，双向冻融相比于单向冻融更加复杂，温度变化频繁且波动较大，导致土体内部的温度分布更加不均匀。

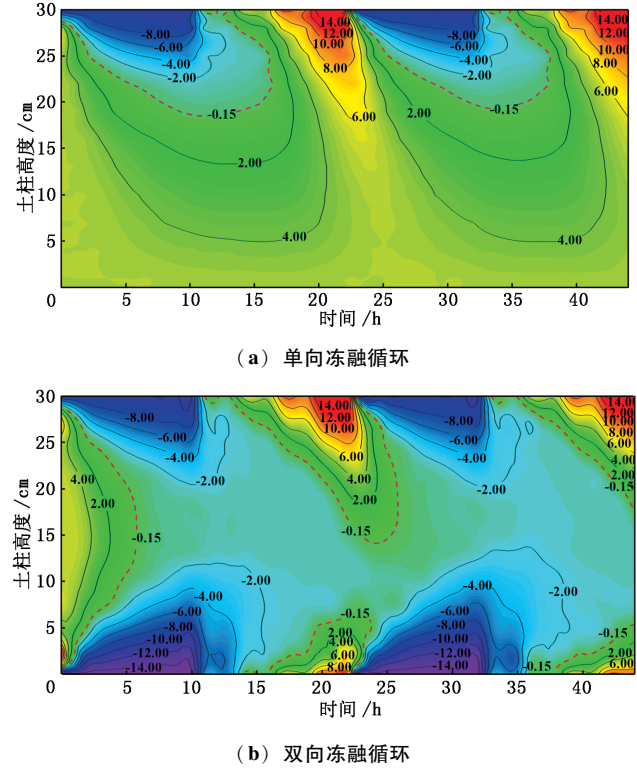


图5 $w=20\%$ 不同冻融条件下温度场演化特征等温图
Fig.5 Isothermal map of the temperature field evolution characteristics under different freeze - thaw conditions $w=20\%$

2.4 冻融作用后水分迁移特征

从图6(a)可以看出，在单向冻融循环作用下，试件的含水率分布显著改变，试件28 cm处的含水率达到最大值。冻结初期，冻结速率最快，试件顶端的水分迅速发生原位冻结，液态水转化为冰，这一过程打破了试件的初始能量平衡状态。此时，在温度梯度的驱动下，下部水分不断向上部区域迁移，直至形成新的能量平衡。靠近冻结锋面的区域含水率最低，这是因为在冻结初期水分逐渐向顶部迁移。未受试验区域含水率减少的主要原因有两方面：一是水分在温度梯度的作用下不断向冻结锋面和受冻融影响区域迁移，但缺乏水分补给；二是该区域试件因固结作用进一步失水，导致含水率下降。试件初始含水率越高，水分迁移量越大，同时上部含水率增加和下部含水率减少的幅度都显著高于初始含水率较低的试件。

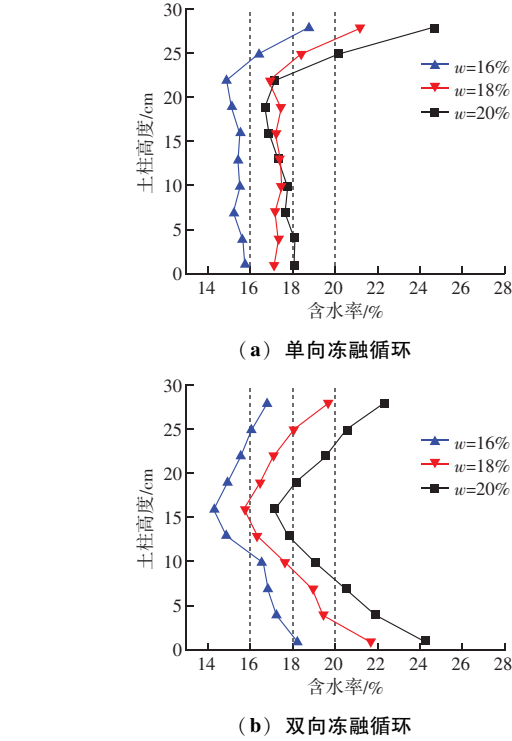


图6 冻融循环前后试件不同高度含水率
Fig.6 Moisture content at different heights of the sample before and after freeze - thaw cycles

从图6(b)可以看出，不同初始含水率的试件在双向冻融循环后，含水率分布呈现显著变化。初始含水率为16%的试件上部28 cm处平均含水率增加0.73%，中部13 ~ 22 cm处平均含水率减少

道桥技术

4.58%，下部含水率增加 4.68%。初始含水率为 18% 的试件顶端 28 cm 处平均含水率增加 1.67%，中部含水率减少 6.97%，底部含水率增加 5.93%。初始含水率为 20% 的试件顶端 25~28 cm 处平均含水率增加 2.73%，中部 10~22 cm 处平均含水率减少 8.61%，底部含水率增加 6.50%。整体来看，随着初始含水率的增加，试件上部含水率增加幅度增大，中部含水率减少范围扩大，底部含水率增加更为显著。且下部水分比上部水分聚集更多，一方面，由于冻结过程中底部温度更低，使更多的水分向下部冻结锋面迁移，融化时水分显著增加；一方面，由于重力作用，使融化水更多向下渗透至底部。在 20% 初始含水率下，上下两端含水率峰值显著增加，而中间水分损失更加剧烈。

综上所述，不同冻融作用后土体含水率分布存在明显不同，试件在经过单向冻融作用后土体上部含水率较初始含水率略有增大，而下部含水率明显低于未冻土及上部土体。而在经过双向冻融作用后，水分整体呈现一个“C”形曲线，试件两端含水率增加，中间含水率减少。其原因在于粉质黏土在非饱和状态下，初始含水率越高，土体中可迁移的自由水越多，水分重分布的效应越明显。

2.5 冻结锋面对比分析

图 7 为顶端冷源温度为 -10℃ 时，不同含水率试件的冻结锋面变化曲线图。从图中可看出，单向冻结模式下，冻结锋面随着时间的延续逐渐增加，但增长速率随着时间推移逐渐减缓，最终趋于稳定，且试件只冻结了上部分；而在双向冻结模式下，冻结锋面从两端基本对称地向中部发展，这表明土体的冻结过程受两个边界温度梯度的驱动，冷量的传递从两端向中部集中，形成了双向推进的冻结锋面，

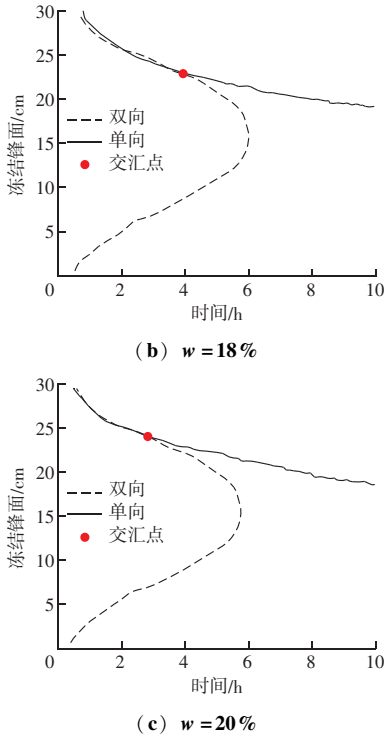
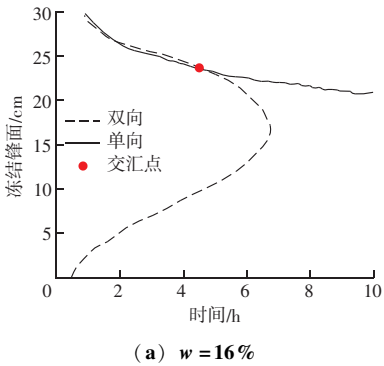


图 7 冻结锋面变化曲线
Fig. 7 The variation curve of the freeze front

最终试件内部的可冻结水已经基本全部冻结，此时冻结锋面已接近试件的中心偏上位置，这是由于双向冻结设定的两端初始降温温度有温差的原因。

在冻结初期，单、双向冻结土体上部的冻结锋面几乎重合，说明此刻两种方式的冻结效率基本相同，这是因为双向冻结是土体冻结锋面时刻还未受到上下冷源的同时影响，初期双向冷却效果尚未完全显现，冻结效率与单向冻结类似。当两曲线交汇时，单双向冻结锋面的位置相等，此时单向冻结在这之后的推进速度明显减缓，开始逐渐被双向冻结超越。在交汇点之后，两种冻结模式的中后期，双向冻结的冻结锋面推进速度显著超过单向冻结，冻结深度更大，表明双向冻结的效率开始明显快于单向冻结，此时双向冻结的冻结锋面推进开始受到上下两个冷源的影响，冻结效率更高。

表 3 展示了土体在双向冻结锋面交汇时两种冻结模式下的上部冻深及最终冻深。当顶端降温温度为 -10℃ 时，16% 含水率试件在双向冻结模式下的冻结深度是单向模式下的 1.77 倍；18% 含水率试件在双向冻结模式下的冻结深度是单向模式下的 1.66 倍；20% 含水率试件在双向冻结模式下的冻结深度是单

向模式下的 1.64 倍。即在双向冻结锋面完全交汇时，双向冻结模式与单向冻结模式冻结深度的比值与初始含水率呈负相关关系。且从表中可以看出在相同的冷端温度作用下，试件的初始含水率越高，试件越容易达到冻结温度，相应的土柱冻深也越大。这一现象表明，初始含水率是影响土体冻结变化的关键因素之一，较高的含水率增强了水分相变的潜热释放，加快了冻结的扩展程度。

表 3 试件冻结深度
Table 3 The freeze depth of soil samples

含水率 /%	单向冻深/cm		双向冻深/cm	
	上部冻深	最终冻深	上部冻深	最终冻深
16	7.80	9.14	13.8	30
18	8.61	10.79	14.3	30
20	8.85	11.28	14.5	30

3 结论

通过对粉质黏土的单向冻融和有温差情况下的双向冻融试验，揭示了粉质黏土在不同冻融条件下的冻融特征，得到以下主要结论：

(1) 单向冻融过程中土体的温度变化较为线性，而双向冻融过程中的温度表现更为剧烈，温度在冻结和融化阶段都出现较大的波动，尤其是由于冻融时温差的存在，使得试件中下部形成一条明显的冷温带，不利土体融化。

(2) 双向冻融循环后较单向冻融后的水分迁移更加具有规律性，具有上部含水率略有增加、中部含水率显著减少、下部含水率明显增加的特性，且不同冻融方式下均具有初始含水率越大，试验后水分迁移越明显的现象。

(3) 单向冻结锋面随时间增长渐缓且稳定，试件仅上部冻结；双向冻结锋面从两端向中部发展，受两端负温影响，冻结效率中后期超过单向冻结，由于冻结温差的影响，冻融下部冻结锋面发展速率远大于上部。

(4) 在具有温差的双向冻结模式下，土体上部冻深与单向冻结的比值随初始含水率升高呈负相关趋势。

基于上述冻深规律，建议季冻区涵洞顶部填土厚度需较非涵洞区增加 1.7 倍，以抵消双向冻结效应

引发的冻胀风险。

参 考 文 献

[1] KONG J, ZHANG J, PENG J, et al. Failure mechanism and movement process of three loess landslides due to freeze – thaw cycle in the Fangtai village, Yongjing County, Chinese Loess Plateau [J]. Engineering Geology, 2023, 315: 107030.

[2] FENG J, HE Z, HUANG C, et al. Evaluation on deformation behavior of subgrade clay under freeze – thaw cycles: Laboratory tests and evolution model [J]. Journal of Central South University, 2023 (5): 1737 – 1749.

[3] 鲁先龙, 陈湘生, 陈曦. 人工地层冻结法风险预控 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (12): 2308 – 2314.

[4] 王天亮, 王海航, 宋宏芳, 等. 人工冻结粉质黏土力学性能演化规律研究 [J]. 中国铁道科学, 2019, 40 (1): 1 – 7.

[5] ZHENG C, CHEN Y, GAO W, et al. Water transfer mechanisms and vapor flow effects in seasonally frozen soils [J]. Journal of Hydrology, 2023, 627 (PA): 130410.

[6] 张玉芝, 王天亮, 张飞, 等. 不同细粒含量下高速铁路基粗颗粒填料水气迁移特征与冻胀特性 [J]. 中国铁道科学, 2021, 42 (4): 1 – 8.

[7] FU Z, WU Q, ZHANG W, et al. Water migration and segregated ice formation in frozen ground: current advances and future perspectives [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 826961.

[8] 温智, 邓友生, 冯文杰, 等. 冻土水分迁移机理研究: 评述与展望 [J]. 冰川冻土, 2023, 45 (2): 1 – 11.

[9] 程国栋, 丁德文. 夏季施工路堤冬季冻结过程的数学模型 [A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 青藏冻土研究论文集 [C]. 北京: 科学出版社. 1983, 209 – 213.

[10] 胡建华, 汪稔. 多年冻土区路基—地质体双向冻结湿热耦合的数学模型 [J]. 土工基础, 2004 (1): 30 – 33.

[11] 阴琪翔, 周国庆, 赵晓东, 等. 双向冻结 – 单向融化土压缩性及水分迁移试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (4): 1021 – 1026, 1034.

[12] 李锐阳, 朱杰. 双向冻结下深厚表土冻胀特性试验研究 [J]. 煤炭技术, 2017, 36 (2): 87 – 89.

[13] 李阳, 李栋伟, 陈军浩. 人工冻结黏土冻胀特性试验研究 [J]. 煤炭工程, 2015, 47 (2): 126 – 129.

[14] 张梓鸿. 深季节冻土区涵洞温度场分布特征研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.

[15] CHEN H, GAO X, CHEN Z, et al. Experiment study and prediction of freezing temperature of NaHCO₃ saline soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 211: 103862.