DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.06.006

基于冻融循环下复合材料改良盐渍土土水特性研究

唐先习[1],万双龙[1],杨 帆[1],石凯琴[2]
(1.兰州理工大学土木与水利工程学院,兰州 730050;2.中国铁路青藏集团有限公司,西宁 810000)

摘要:为提升盐渍土在冻融-盐胀耦合特殊环境下的持水能力,本文采用硫铝酸盐水泥(SAC)与剑麻纤维(SF)复合改良土体,利用滤纸法探究常温与冻融循环条件下改良土的土水特征曲线(SWCC)变化规律,通过模型对比选取最优模型进一步分析土体的持水能力在冻融循环作用下的变化机制,借助传感器从动态角度揭示冻融循环过程中基质吸力随温度变化的完整规律。结果表明:复合材料显著提升了土体的持水能力,其中10% SAC+0.7% SF配比效果最优;冻融循环导致SWCC整体向左下移动,但复合材料有效抑制了结构损伤,移动幅度小;Van Genuchten模型对该类土体SWCC拟合效果最佳,冻融循环导致土体模型参数向不利于土体持水能力方向发展,但冻融后改良土仍具有优异的土水参数;冻融循环过程中,当温度小于起始冻结温度时,基质吸力增大,而融化时基质吸力先出现短暂升高后快速回落。

关键词:盐渍土;冻融循环;土水特征曲线;Van Genuchten模型;水分迁移
中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-3575(2026)06-0041-08

Research on the Improvement of Soil and Water Characteristics of Saline Soil Based on Composite Materials under Freeze-thaw Cycles

TANG Xianxi[1], WAN Shuanglong[1], YANG Fan[1], SHI Kaiqin[2]
(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*;
2. *China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining* 810000, *China*)

Abstract: To enhance the water-holding capacity of saline soil under the special environment of freeze-thaw and salt-swelling coupling, in this paper, sulphoaluminate cement (SAC) and sisal fiber (SF) were combined to improve the soil. The filter paper method was used to explore the variation law of the soil-water characteristic curve (SWCC) of the improved soil under normal temperature and freeze-thaw cycling conditions. By comparing models, the optimal model is selected to further analyze the variation mechanism of the soil's water-holding capacity under the action of freeze-thaw cycles. With the help of sensors, the complete law of the substrate suction force changing with temperature during the freeze-thaw cycle process is revealed from a dynamic perspective. The results show that the composite materials significantly enhance the water-holding capacity of the soil mass, among which the ratio of 10% SAC+0.7% SF has the best effect. The freeze-thaw cycle causes the SWCC as a whole to move downward to the left, but the composite material effectively inhibits structural damage, and the movement amplitude is small. The Van Genuchten model has the best fitting effect on SWCC for this type of soil. Freeze-thaw cycles cause the parameters of the soil model to develop in a direction unfavorable to the water-holding capacity of the soil, but the improved soil still has excellent soill-water parameters after freeze-thaw. During the freeze-thaw cycle, when the temperature is lower than the initial freezing temperature, the substrate suction increases, while during thawing, the substrate suction first rises briefly and then drops rapidly.

Key words: Saline soil; Freeze-thaw cycle; Soil-water characteristic curve; Van Genuchten model; Moisture migration

青海湖位于青藏高原东北部,周边广泛分布着盐渍土。该类土体具有普遍的水敏性和溶陷性:遇水后结构迅速软化,导致变形;失水时则剧烈收缩,诱发开裂。在气候变化背景下,区域降水增多与冻融频率增加,进一步加剧了水分迁移,增加了盐渍土边坡的病害风险。而边坡的稳定性密切依赖于其湿度状态,湿度分布主要受基质吸力控制[1]。土水特征曲线(SWCC)能够表征非饱和土中基质吸力与含水率间的关系。因此,系统研究该地区盐渍土的SWCC具有至关重要的理论与工程意义。

通过向边坡土体内加入改良物质来改善边坡土体结构、增强边坡稳定性是一条可行的路径[2],其中水泥是工程中应用较为广泛的改良材料。胡孝彭等[3]发现土体持水能力随水泥添加量的增加而增强。王辉[4]以温州地区土体为例,通过饱和盐溶液蒸汽平衡法发现吸力小于30 MPa时,曲线随水泥掺

收稿日期:2025-09-09
基金项目:国家自然科学基金项目(11962016);中国铁路青藏集团有限公司科技研究开发计划项目(2025QZzhtl-G01)
作者简介:唐先习(1972—),男,博士,副教授,主要从事寒旱区特殊土理化性质方面的研究,E-mail:695913483@qq.com

量的增加而上升。Liu等[5]采用压力板法、滤纸法和蒸汽平衡技术发现随着水泥含量的增加,土体的持水能力增强。上述研究表明,水泥掺量越大土体的持水能力越强。但由于水泥本身具有脆性且在冻融循环下易产生裂缝,裂缝会成为水分入渗的快速通道,影响其长期水稳性。纤维掺入不仅能改善水泥的脆性[6],抑制土体开裂[7],还能提升土体的持水能力[8]。而剑麻纤维(SF)因其绿色可再生、抗拉强度高、耐碱性能优异等优点,被视为与水泥复合改良土体的理想材料。青海湖地区低温持续时间长,气候条件恶劣,硫铝酸盐水泥(SAC)所具有的优异抗冻性能满足该地区工程建设的特殊要求[9]。因此,本文使用SAC与不同配比的SF复合探究复合材料对环青海湖某路段盐渍土的土水特性影响。现阶段的研究多集中于常温情况下单一材料对土体的改良效应,而对于复合材料特别是应用于冻融-盐胀耦合特殊环境下的土水特性研究仍存在明显空缺。本文不仅探究了复合材料在特殊环境下的SWCC变化规律,通过模型对比选取最优模型进一步分析土体的持水能力在冻融循环作用下的变化机制,并创新性引入pF-Meter与SM926传感器,从动态角度揭示冻融循环过程中基质吸力随温度改变的完整规律。

1 材料与方案

1.1 试验材料属性

本文所用土样取自环青海湖某路段盐渍土,取样深度约0.5 m,其主要物理性质如表1所示。所用SAC标号为42.5,如图1-a所示;SF试验长度约10 mm,如图1-b所示。

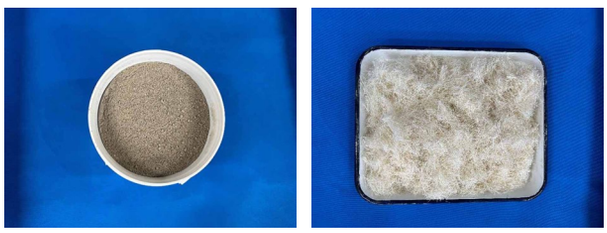
表1 土的基本物理属性

Table 1 The basic physical properties of soil

液限/%	塑限/%	塑限指数	液限指数	最大干密度/(g·cm^{-3})	最佳含水率/%
24.20	16.10	8.10	<0	1.72	13.60

1.2 SF水接触角测定

水触角可评判材料的亲水性[10-11]。SF水接触角的测定使用DSA-100型仪器,并采用座滴法完成,测试液体为去离子水。图2为SF水接触角测试图,试验所用的SF平均水接触角为54.4°。当水接触角小于90°时表明材料表面具有亲水性,水接触角越小,亲水性越强[12]。因此SF材料具有较强的亲水性。



(a) SAC (b) SF

图1 试验材料

Fig. 1 Test materials



(a) 测试1 (b) 测试2

图2 SF的水接触角

Fig. 2 The water contact angle of SF

1.3 试验原理及流程

1.3.1 滤纸法

图3展示了滤纸法的主要流程。首先,称取一定量烘干土,按表2配比将SAC、SF与烘干土充分混合均匀。其次,加入相应水量,搅拌均匀后密封闷料24 h,采用静压加载装置压实成型。试样尺寸为标准环刀尺寸,高20 mm,直径61.8 mm。将成型试样与滤纸(双圈牌203型滤纸)相互接触,并在密封环境中静置10 d,其间两者发生水分交换,直至内部达到平衡。通过烘干法测定滤纸与试样的含水率,并利用王钊等[13]提出的率定曲线确定土体的基质吸力,见式(1)所示。最后,将试样的质量含水率按式(2)转换为体积含水率,即可根据基质吸力与体积含水率在半对数坐标系中绘制土体的SWCC。

$$\lg(\psi)=\begin{cases}-0.076\,7\omega_{fp}+5.493 & (\omega_{fp}\leqslant 47\%)\\ -0.012\,0\omega_{fp}+2.470 & (\omega_{fp}>47\%)\end{cases} \tag{1}$$

表2 试样配比

Table 2 Sample ratio

SAC配比/%	SF配比/%	吸力点个数/个	含水率梯度/%	试样含水率/%
10	0.1 0.3 0.5 0.7 0.9	8	2	6~20

$$\theta = \frac{\omega\rho_d}{\rho_\omega} \tag{2}$$

式中：ψ 为基质吸力，kPa；ω_{fp} 为滤纸含水率，%；θ 为体积含水率，%；ω 为质量含水率，%；ρ_d，ρ_ω 分别为土密度和水密度，g/cm^3。

1.3.2　传感器法

冻融循环过程中，土体内部因温度梯度驱动导致水分向冷端迁移，引起水分分布变化[14]。当土体局部基质吸力因水分重分布而发生动态变化时，原有平衡状态被打破，陶土板与周围土体通过水分交换重新建立基质吸力平衡。从而可通过获得陶土板的基质吸力来间接确定土体基质吸力。由于pF-Meter传感器仅能输出基质吸力数据，因此需结合SM926传感器同步测定对应温度。测量数据通过SD60数据接收器传输至电脑，进而绘制出基质吸力随温度变化关系图，试验流程见图4所示。传感器法试样制作过程与滤纸法相似，土柱试样尺寸高150 mm，直径为120 mm。

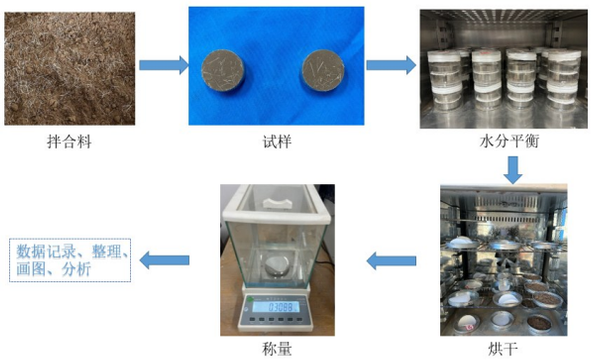


图3　滤纸法流程图

Fig. 3　Flowchart of the filter paper method

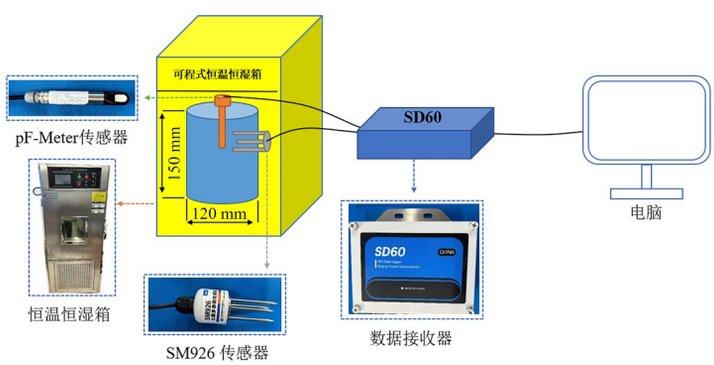


图4　传感器法流程图

Fig. 4　Flowchart of the sensor method

1.4　试验方案

为模拟环湖路段冬季和夏季的实际气温条件，本文利用可程式恒温恒湿箱模拟土体的冻融循环过程。设定冻融温度分别为−20 ℃和20 ℃，冻结融化时长都为12 h，一个完整的冻融循环周期为24 h，冻融循环次数为0次、1次、3次、6次、9次和12次。通过滤纸法研究素土及10%SAC复掺不同配比SF组成的复合材料改良土在常温与冻融条件下的SWCC变化规律（课题组前期已完成不同SAC配比的相关研究，结果表明，10% SAC配比不仅能有效提升土体强度、满足工程要求，还具有较低的脆性指数和较高的经济性）。对比两种目前常用模型，选取最优模型对土体的土水参数变化进行分析，进而阐释土体持水能力在冻融循环作用下的变化机制。最后，引入pF-Meter与SM926传感器，从动态角度分析冻融循环过程中基质吸力随温度变化的原因，以揭示其完整变化规律。

2　结果与分析

2.1　常温下土体SWCC规律分析

图5为土体在常温下SWCC变化规律图，图中

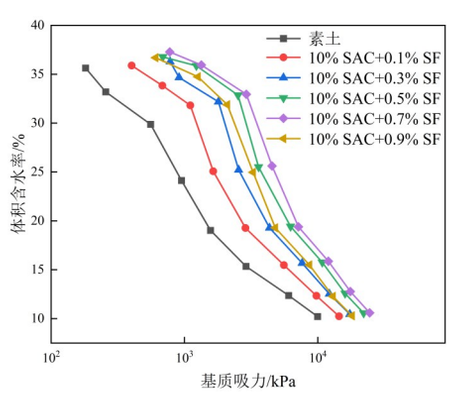


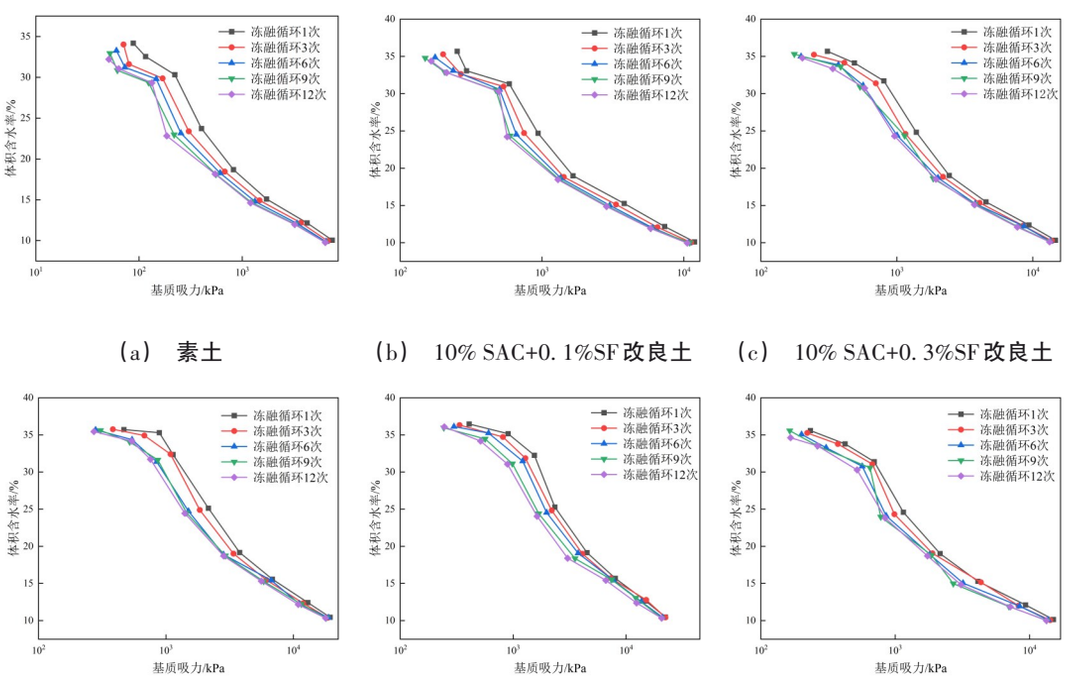
图5　常温下土体SWCC变化规律

Fig. 5　The variation pattern of soil SWCC at normal temperature

试样的SWCC均呈现典型变化规律：随着基质吸力增大，体积含水率逐渐减小，且呈非线性变化关系。SWCC越向右上方移动，土体的持水能力越强[15]。改良土SWCC均位于素土右上方，表明复合材料有效增强了土体的持水能力。因为SAC的水化反应生成钙矾石等产物，填充孔隙增大土体进气压力值。进气压力值会影响SWCC的位置，即进气压力值增大，SWCC向右上方向移动[16]。而SF吸附部分水分，减少水分流失。随着SF掺量从0.1%增至0.9%，持水能力先增强后减弱：0.1% SF复合材料改良土持水能力最差但仍优于素土；0.3%和0.5% SF逐步提高；0.7% SF达到最优，0.9% SF时SWCC略低于0.7%，说明过量SF可能形成连通通道，反而削弱土体持水能力。

2.2 冻融循环下土体SWCC规律分析

图6展示了冻融循环作用下土体SWCC的变化规律。冻融循环对所有试样的SWCC均产生不利影响。具体表现为随着冻融循环次数的增加，SWCC整体向左下移动，且在冻融循环次数较少时SWCC的移动幅度更为明显，而在冻融循环次数较高时差异逐渐减小。这表明冻融循环作用对土体持水能力的影响具有持续性，但当冻融循环次数达到一定次数后，土体结构损伤趋于稳定，后续冻融作用影响相应减弱。素土由于结构较为松散、缺乏胶结物质，在冻融循环过程中易发生破坏，SWCC移动幅度较大。相比之下，复合材料改良土的SWCC虽也向左下移动，但移动幅度小。其中，10% SAC+0.7% SF改良土的表现最优，表明此时水化产物的胶结作用与SF的桥接作用达到最佳协同状态，有效抑制冻融导致的结构损伤。此外，在高基质吸力区段，不同冻融循环次数下的SWCC趋于重合，体积含水率均下降至10%左右，说明高吸力范围内冻融循环作用对土体持水能力的影响较小；而在低吸力区段，影响则较为显著。



（a） 素土 （b） 10% SAC+0.1%SF改良土 （c） 10% SAC+0.3%SF改良土

（d） 10% SAC+0.5%SF改良土 （e） 10% SAC+0.7%SF改良土 （f） 10% SAC+0.9%SF改良土

图6 冻融循环作用下土体SWCC变化规律

Fig. 6 The variation pattern of soil SWCC under freeze-thaw cycles

2.3 SWCC拟合分析

2.3.1 SWCC模型选取

SWCC模型中的拟合参数与所用土体的性质有很大的相关性[17]。因此，通过对SWCC模型参数的分析，可以定量对比不同土质持水能力的差异，从而为SWCC的宏观变化规律阐述内在变化机制。目前，国内外学者对于SWCC模型的研究中，研究较多的是Van Genuchten[18]、Gardner模型[19]，分别见式(3)和(4)所示。

Van Genuchten模型：

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (3)$$

Gardner模型：

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha\psi^n} \quad (4)$$

式中：θ_r为残余体积含水率，%；θ_s为饱和体积含水率，%；α为进气压力值的倒数，kPa^{-1}；n与土的孔径分布范围相关；m与SWCC的整体对称性相关，一般取1−1/n。

表3和表4是不同模型的拟合度。Van Genuchten模型拟合度的总平均数为0.989，高于Gardner模型的0.985。在拟合稳定性方面，Van Genuchten模型除10% SAC+0.1% SF改良土在第1次冻融循环时拟合较差，其余各组改良土在不同冻融循环次数下R^2均非常稳定且保持在较高水平，表现出更强的稳定性。Gardner模型虽然整体拟合也较好，但素土和10% SAC+0.9% SF改良土在第1次冻融循环时分别出现R^2=0.850和R^2=0.963的较低值，波动范围大，稳定性相对于Van Genuchten模型较差。因此，综合拟合度和稳定性，Van Genuchten模型对于该地区土质有更好的适用性。

表3　Van Genuchten模型拟合度

Table 3　Van Genuchten model fit

复合材料中SF掺比	不同冻融次数(1、3、6、9、12)拟合度R^2	总平均数
素土	0.996、0.992、0.991、0.992、0.983	0.989
10% SAC+0.1% SF	0.900、0.987、0.988、0.985、0.980	
10% SAC+0.3% SF	0.997、0.996、0.997、0.997、0.996	
10% SAC+0.5% SF	0.995、0.995、0.994、0.995、0.996	
10% SAC+0.7% SF	0.994、0.996、0.994、0.994、0.996	
10% SAC+0.9% SF	0.996、0.991、0.993、0.982、0.995	

表4　Gardner模型拟合度

Table 4　Gardner model fit

复合材料中SF掺比	不同冻融次数(1、3、6、9、12)拟合度R^2	总平均数
素土	0.850、0.990、0.990、0.991、0.982	0.985
10% SAC+0.1% SF	0.988、0.986、0.987、0.984、0.979	
10% SAC+0.3% SF	0.996、0.994、0.995、0.996、0.995	
10% SAC+0.5% SF	0.993、0.993、0.992、0.993、0.994	
10% SAC+0.7% SF	0.994、0.994、0.992、0.991、0.996	
10% SAC+0.9% SF	0.963、0.991、0.992、0.982、0.995	

2.3.2　拟合参数分析

根据上述分析，复合材料中10% SAC+0.7% SF改良土的表现最优，因此将其与素土进行对比，并基于Van Genuchten模型对SWCC拟合参数进行分析。图7为Van Genuchten模型拟合参数变化图。根据图7-a可知，复合材料改良土的θ_r值在经历前3次冻融循环后不降反升，高于初始值。该现象可归因于在冻融循环初期，冰晶膨胀产生的挤压作用力将土体中原有大孔隙分割、压缩，使其转化为尺度更小的小微孔隙。并且复合材料中的SF及水化产物所形成的增强骨架有效约束了土体的变形，维持了新孔隙结构的稳定性，从而增强了土体的持水能力。随着冻融循环次数的进一步增加，部分小微孔隙发生合并或塌陷，导致θ_r下降，最终稳定在一个高于素土的数值。相比之下，素土结构稳定性较差，经历1次冻融循环后土体即趋于松散，θ_r持续下降。图7-b表明，冻融循环导致土体的θ_s下降并最终趋于稳定。其中素土的下降幅度最为明显，表明复合材料能有效抑制冻融循环对孔隙结构的破坏，从而能更好维持土体的持水能力。对于图7-c，参数α均随冻融循环次数的增加而增大。α越大表明土体外部的空气越易进入土体，导致土体在较小的吸力下就开始排水。这可能是因为在冻融循环作用下水相变导致的冻胀与融沉作用会持续破坏土体结构，促使裂隙生成与发展，使得水分在更低的吸力下即可开始排出，导致土体持水能力降低。复合材料改良土的α值在整个冻融中始终低于素土，表明改良土具有更高的进气值。n值代表了土体的孔隙分布情况，孔隙尺寸越均匀，参数n越大[20]。由图7-d可知，复合材料改良土的n值均大于素土。这主要是由于水化产物等的填充作用使孔隙分布集中于某尺寸范围，从而提高了孔隙均匀性。当基质吸力达到临界值时，由于孔隙的均匀性，水分会在较窄的吸力区间内被迅速排出，导致改良土在中吸力段的脱水速率高于素土。此外，随着冻融循环次数的增加，n值逐渐下降。反复冻融产生新的不规则孔隙和裂隙，导致孔隙分布范围增大，均匀性降低。孔隙均匀性的提高虽加快了改良土中吸力段的脱水速率，但SAC水化产物和SF的协同作用仍使改良土保持较强的持水能力。

2.4　传感器动态监测分析

2.4.1　起始冻结温度分析

土体的起始冻结温度是研究冻融循环过程中基质吸力变化的重要因素。SM926传感器能准确测量土体的温度变化。图8为素土和10% SAC+0.7% SF复合材料改良土的温度变化图。试样的温度变化可分为四个阶段：第一阶段，从初始正温降至接

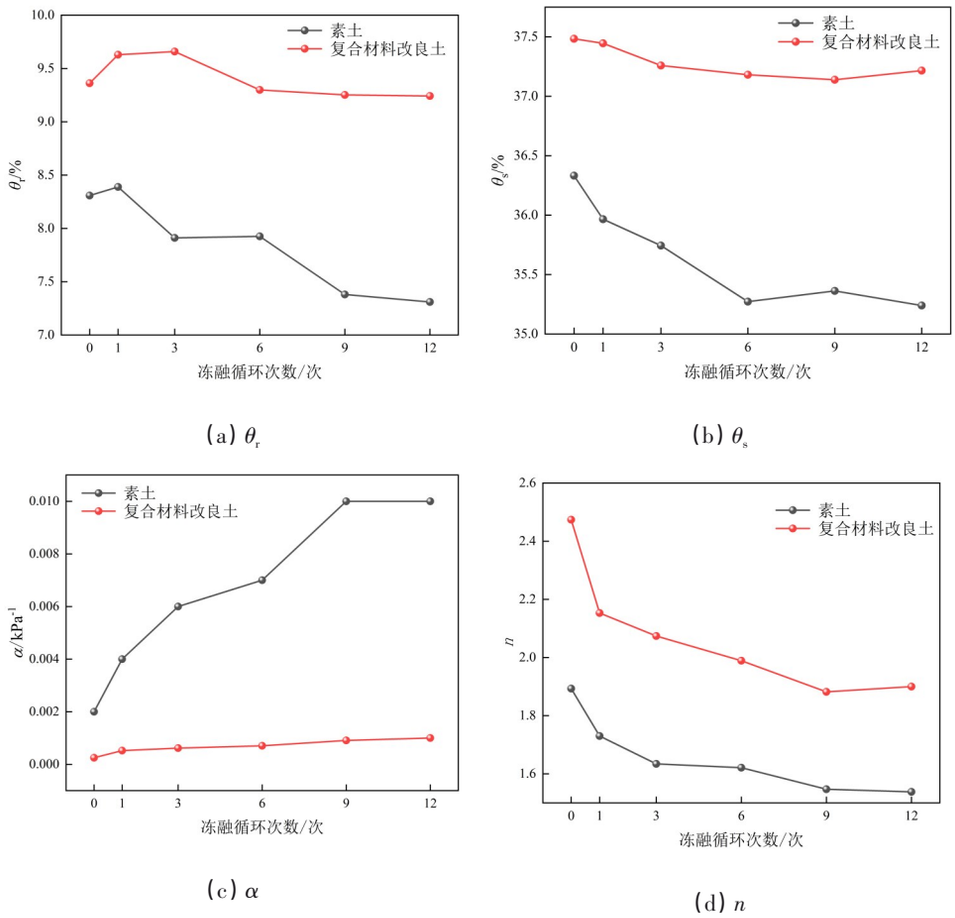


图7 Van Genuchten模型参数

Fig. 7 Parameters of Van Genuchten model

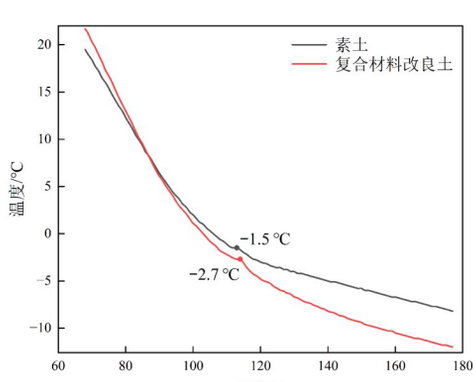


图8 温度变化规律

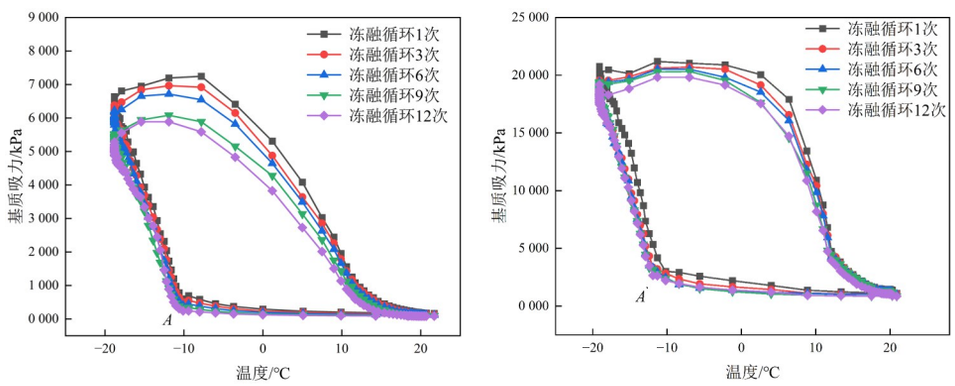
Fig. 8 Temperature variation pattern

近起始冻结温度，此时土中自由水开始相变[21]；第二阶段，温度短暂下降至起始冻结温度以下，自由水在达到冰点时并不会立即结冰，而是进入一种过冷状态。潜热的释放促使温度迅速跃升至一个相对稳定的平台温度，此温度即为起始冻结温度；第三阶段，冰晶继续生长，潜热持续释放，土体温度下降变缓；第四阶段，随着相变过程基本完成，温度持续下降至目标温度。复合材料改良土的起始冻结温度明显低于素土，这可能是因为SAC水化反应会消耗自由水，SF吸附部分水分，土中盐浓度增加，从而降低了土体的起始冻结温度。冻结条件下水分迁移量较大且集中，起始冻结温度的降低可在相同负温环境下减少水分向冰晶迁移量[22-23]，因而影响基质吸力变化。

2.4.2 基质吸力变化规律分析

图9为土体基质吸力随温度变化关系图。从曲线的整体变化趋势角度分析，在温度未降至土体起始冻结温度之前，土体的基质吸力基本保持稳定。当温度低于土体起始冻结温度并持续下降后，基质吸力逐渐增大。这是由于土柱上端自由水开始冻结，导致其含水率不断降低，从而引起基质吸力上升。图9中A和A'点并不对应图8中土体的实际起始冻结温度，因为传感器同时布置在土体同一位置会增大对土体结构的破坏。因此，SM926传感器布

置于土柱侧面，而pF-Meter传感器因内部含有液柱，为避免因倾斜引起液柱静压误差，需垂直插入土柱上表面。两种传感器的布置位置存在一定距离（差异），导致由基质吸力与温度组合得到的曲线出现滞后现象。随着温度回升，土体的基质吸力先短暂上升后迅速下降。这主要归因于土柱上端温度首先回升至起始冻结温度以上，冰晶融化后水分向仍处于低温的下端迁移，导致上端含水率降低、基质吸力暂时升高。待整体温度大于起始冻结温度后，水分重新分布，上端含水率回升，基质吸力因而快速下降。随着冻融循环次数的增加，在温度梯度的作用下土柱上端水分不断聚集[24-25]，导致测试点基质吸力随冻融循环次数的增加而下降。复合材料改良土不同冻融循环次数间的曲线分布较素土更为集中，表明素土受冻融循环作用影响较大，土体结构破坏程度较高，而复合材料有效提升了土体的结构稳定性与抗冻性。



（a）素土　　（b）复合材料改良土

图9　基质吸力随温度变化规律

Fig. 9　The variation law of matrix suction with temperature

3　讨论

当前研究多集中于常温环境下单一材料的改良效果，而关于复合材料在特殊环境中的土水特性研究仍相对匮乏。本文采用滤纸法探究SAC与不同配比SF复合对土体在常温及冻融循环条件SWCC变化规律。通过对比现有常用SWCC拟合模型，选取更适用于该地区土体的拟合模型，并基于模型参数的定量分析，探讨了冻融循环作用对土体持水能力的影响机制。同时，联合pF-Meter与SM926传感器，动态监测冻融循环过程中基质吸力随温度的变化过程并分析变化原因，以揭示其完整的变化规律。然而，目前研究仍存在一定局限性。由于传感器布置位置的差异，所获得的基质吸力与温度关系曲线存在一定滞后现象。未来研究可采用同点同步监测技术，以更准确揭示冻融循环过程中基质吸力随温度的变化规律。

4　结论

① 复合材料可显著提升该地区盐渍土的持水能力，其中10% SAC+0.7% SF配比在常温与冻融循环条件下均表现最优，持水能力增强主要归因于SAC水化产物的孔隙填充作用与SF亲水性的协同配合。

② 冻融循环作用导致土体SWCC向左下移动，但复合材料改良土移动幅度小，表明其具有更好的结构稳定性和抗冻性。冻融循环前期对土体持水能力影响显著，后期逐渐趋于稳定。

③ Van Genuchten模型对该地区盐渍土SWCC拟合精度高、稳定性好，适用于定量分析土水特性参数。参数分析表明，冻融循环作用降低了土体的θ_r、θ_s并增大了α，导致土体的持水能力向不利于其方向发展。复合材料改良土冻融后仍保持着优异的土水参数。

④ 复合材料有效降低了土体冻结温度。在冻融循环过程中基质吸力变化受温度驱动，即随着土体温度持续下降，当温度小于起始冻结温度时，基质吸力增大。而融化时基质吸力先出现短暂升高后快速回落。

参考文献:

[1] 刘武江,段青松,杨 松,等. 不同改良剂对红壤土水特征曲线及吸附强度的影响[J]. 灌溉排水学报,2023,42(9):68-78.

[2] 朱咏莉,刘 军,王益权. 国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. 水土保持学报,2001,15(6):140-142.

[3] 胡孝彭,赵仲辉. 基于压汞法的水泥固化淤泥持水特性研究[J]. 人民黄河,2016,38(3):116-119.

[4] 王 辉. 高吸力下非饱和重塑土力学性能和微观结构特性研究[D]. 温州:温州大学,2018.

[5] LIU W H,SANG J,HONG G Q,et al. Experimental investigations on the soil-water characteristic curve and the deformation behaviors of unsaturated cement-stabilized soft clay[J]. International Journal of Geomechanics,2023,23(10):04023183.

[6] 王凤池,王昱宁,张晨阳,等. 剑麻纤维加筋水泥土力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):313-321.

[7] 喻永祥,闵 望,宋京雷,等. 剑麻纤维复合黏性土裂隙发育特征及其机理研究[J]. 矿产勘查,2021,12(6):1448-1454.

[8] 陈 锐,陈 海,包卫星,等. 地聚合物固化含黏风积沙土-水特征曲线[J]. 交通运输工程学报,2023,23(4):128-141.

[9] 王守德. 碳纤维硫铝酸盐水泥复合材料的制备及其机敏特性[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.

[10] 曹展瑞,纪灿灿,赫彝姗,等. 阴离子交换型乙烯-乙烯醇共聚物纳米纤维气凝胶蛋白分离材料[J]. 纺织学报,2025,46(4):29-37.

[11] 赵莹莹,陈文杰,李忠华,等. 用于染盐分离的二乙烯三胺胺化聚酰胺卷式超滤膜的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程,2025,41(5):68-76.

[12] 黄敬哲. 仿生MOFs混合基质膜的制备及其多酚纯化应用研究[D]. 长春:吉林大学,2024.

[13] 王 钊,杨金鑫,况娟娟,等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报,2003,25(4):405-408.

[14] 王泽帆,刘东海,岳雪琴,等. 相变黏土单向冻融作用下冻胀特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(4):705-714.

[15] 舒立彬. 多元煤基固废生态土壤理化性质和植生性能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.

[16] 吴礼舟,黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析[J]. 水文地质工程地质,2011,38(1):94-98.

[17] 张正安,赵 强. 粉土最优土水特征曲线模型[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2023,33(4):8-13.

[18] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[19] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science,1958,85(4):228-232.

[20] 桑 进,刘文化,张洪勇,等. 全吸力范围内固化土的土-水特征曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3842-3850.

[21] 王升福,张祥荣,周 彪,等. 人工冻结水泥改良软黏土冻融及强度特性研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2024,47(4):370-380.

[22] 朱 杰,刘睿智,王 浩. 哈尔滨市松北区粉质砂土的冻胀特性研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(2):41-50.

[23] 周琨超,王志远,翟金榜,等. 振动荷载作用下近相变区冰-水相变迁移规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(2):550-562.

[24] 刘红希,范昊明,许秀泉. 黑土冻融过程中水分垂直迁移模拟研究[J]. 水土保持学报,2021,35(1):169-173.

[25] 张建勋,毛雪松,刘飞飞,等. 单向冻结条件下非饱和土水分迁移规律研究[J]. 冰川冻土,2023,45(3):1080-1091.