

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0083

ZHANG Jianxun, MAO Xuesong, LIU Feifei, et al. Study on water migration behavior of unsaturated soil under unidirectional freezing condition [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3):1080-1091. [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.]

# 单向冻结条件下非饱和土水分迁移规律研究

张建勋<sup>1</sup>, 毛雪松<sup>1</sup>, 刘飞飞<sup>1,2</sup>, 吴谦<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了揭示路基冻结过程中地下水和土性对水分迁移规律的影响, 针对开放体系和封闭体系的粉质黏土和砂土进行了单向冻结条件下的水分迁移试验。通过土柱上层位置设置碎石层, 阻断液态水迁移路径, 监测冻结过程中土柱的水热变化, 结合土柱冻结深度、冻结速率曲线、含水率分布曲线和补水时程曲线, 分析仅水汽补给时对土柱顶部水分聚集和冻结特征的影响。试验结果发现, 无论是封闭体系还是开放体系, 粉质黏土和砂土土柱都会在冻结区中形成两处水分聚集区: 第一水分聚集区为控温板底部, 以霜的形式聚集, 主要是由土柱顶部土体的水汽迁移并凝华相变形成; 第二水分聚集区为冻结区中液态水和气态水共同迁移形成, 随着冻结锋面的向下推移, 形成不连通孔隙的界面, 液态水向 0℃冰锋线迁移聚集并相变成冰, 水汽迁移路径受阻而凝华成冰, 致使该处含水率显著增加。相较于封闭体系, 开放体系使两处水分聚集区产生更大的水分增量。相比于粉质黏土, 砂土介质孔隙较大, 在试验时间内水汽补给对水分聚集区的影响更明显, 但由于砂土持水能力减弱, 水汽补给速率随时间逐渐减小。

**关键词:** 单向冻结; 非饱和土; 水汽迁移; 开放体系; 封闭体系; 未冻水

**中图分类号:** TU411; TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)03-1080-12

## 0 引言

为贯彻“交通强国”战略和“一带一路”倡议, 我国季节冻土区和多年冻土区<sup>[1-3]</sup>修筑了大量的交通设施, 包括铁路、公路和机场道路等。冻土区的交通设施在降雨、地下水以及大气温度变化等综合作用下, 路基易出现不均匀冻胀、融沉变形和纵向裂缝等典型的工程病害<sup>[4-7]</sup>。大量资料表明, 土体冻结过程中, 水分不断向冻结锋面迁移发生相变引起冻胀<sup>[8]</sup>, 是造成寒区道路病害的重要原因。因此, 研究路基土内水分迁移规律对揭示路基病害机理具有重要意义。

路基土大多为非饱和状态, 土体冻结过程中发生的水分迁移为水汽混合迁移, 不仅包括液态水迁移, 还涉及到水汽混合迁移。早期的研究通常认为水汽迁移在冻土的水汽迁移中占比很低<sup>[9-10]</sup>, 可以忽略不计, 因此以往的研究主要是针对液态水或饱

和状态下的水分迁移情况。但是许多研究发现, 在降雨稀少, 地下水位低且土体含水率小的寒旱区, 水汽迁移是水汽混合迁移的主要形式。Zhang等<sup>[11]</sup>借助示踪剂追踪和图像处理技术可视化地分析了粗粒土的水分迁移机制, 也证明了水汽迁移对于非饱和土路基来说不可忽视。所以, 即使是颗粒较大的粗粒土路基顶部也常常发生严重的水分聚集破坏现象。在冻土混合态水汽迁移驱动力的理论研究方面, 发现冻土中水汽混合迁移不是某个力单独作用的结果。冻结过程中液态水(未冻水)会受到多种力的驱使而发生迁移, 但由于驱动力的数量和方向的复杂性, 很难从力学的角度定量地表征冻土中液态水的运移。针对这些现象, 徐学祖等<sup>[12]</sup>、Harlan<sup>[13]</sup>、Taylor等<sup>[14]</sup>提出了土水势的概念。土体中的孔隙水受到的毛细管作用力、土颗粒的吸附力、溶质的吸引力等作用产生的基质势、溶质势、压力势

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878064; 51378072); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102218408; 300102219108)资助

作者简介: 张建勋, 博士研究生, 主要从事多年冻土地区路基研究. E-mail: 2020021058@chd.edu.cn

通信作者: 毛雪松, 教授, 主要从事特殊土路基方面的科研与教学工作. E-mail: xuesongmao@chd.edu.cn

和重力势等统称为土水势。土水势可作为液态水迁移的主要驱动力,含水率梯度、温度梯度和压力梯度是影响土水势的重要因素。毛雪松等<sup>[15]</sup>、许健等<sup>[16]</sup>也通过室内试验,发现了在冻结过程中液态水在基质势、重力势以及温度梯度的作用下向冷端迁移的现象。为探明非饱和土中水汽迁移驱动力和水汽迁移增水机理,国内外学者也进行了诸多研究。Jackson<sup>[17]</sup>、王铁行等<sup>[18]</sup>、滕继东等<sup>[19]</sup>基于土力学、流体力学等相关理论和室内水汽迁移试验,证实水汽密度梯度是引起水汽运移的根本因素,温度梯度和含水率梯度又是产生水汽密度梯度的重要原因。在负温季节时期,路基土体内部形成明显的温度梯度,路基上部的非饱和土体在冻结过程中,液态水和气态水(水汽)分别发生冻结和凝华,降低了初始土体的湿度,形成“上小下大”的湿度梯度,促进深层路基土体的液态水不断相变为水汽,以维持土体的水汽湿度平衡,同时伴随着水汽补给至冷端土体发生冷凝或凝华<sup>[19-20]</sup>。实际道路工程中,路基上部为密闭的上覆结构(无机结合料层和路面结构层),向上迁移的大量液态水和水汽会汇集于密闭结构下方,形成路基顶部水分聚集冻结,降低了路基结构的强度,并诱发更严重的道路结构变形或开裂等病害,李强将此现象称为“锅盖效应”<sup>[21]</sup>。姚仰平等<sup>[6-7]</sup>、张升等<sup>[22]</sup>进行了一系列冻结试验,探究温度梯度、初始含水率、干密度等因素对水分迁移的影响,证实了冻结条件下温度梯度越大,水汽运移现象越明显。当地下水位较低,初始含水率较大,以液态水迁移为主;当地下水位较深,初始含水率小,以水汽迁移为主。

通过分析发现,目前对冻结土体的水分迁移做了大量研究,主要集中于液态水迁移方面以及不同因素对于水分迁移影响的作用,但单纯的水汽补给对于水分聚集和冻结特性的影响成果较少,对水分运移规律的探究缺乏定量的分析。另一方面,对于非饱和土体来说,介质孔隙是水分运移的通道,不同的土性具有不同的介质孔隙,进而影响水分迁移的作用。地下水补给也是影响水分运移的重要环境因素。但目前探究土性和地下水补给对水分迁移规律影响的研究较少。因此,在地下水补给和土性条件存在差异的情况下,探究单纯的水汽补给对水分迁移规律的影响,并对其规律进行量化分析,对完善非饱和土的水分运移理论具有重要意义。

本文以粉质黏土和砂土为研究对象,通过自主研发的可以模拟地下补水的水分迁移装置,在土柱

中设置碎石层以保证单纯的水汽补给,进行系列单向冻结试验,定量分析封闭体系和开放体系以及土性不同的情况下,水汽补给对土柱顶部水分聚集和冻结特性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土体的基本物理性质

选用西北寒旱区典型的路基填料、粉质黏土和砂土作为试验用土(图1),取土点位于陕西省延安市。试验土样的粒径分布如表1所示。可知,粉质黏土粒径小于0.075 mm的含量为30.2%,砂土粒径小于0.075 mm的含量为2%;相对砂土,粉质黏土的细粒含量较多,介质孔隙也相对较小。粉质黏土的比重为2.72,液限和塑限分别为30.5%和17.7%,最佳含水率为14.1%,最大干密度为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。砂土的比重为2.67,最佳含水率为9.0%,最大干密度为 $1.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

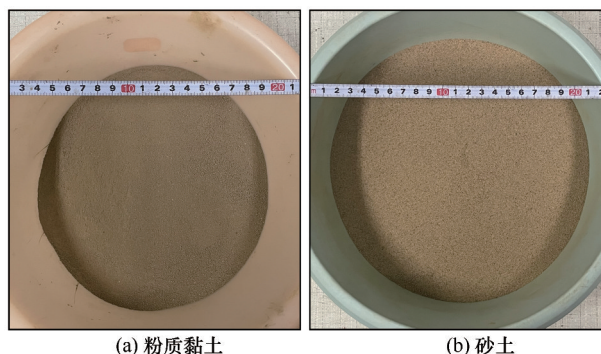


图1 试验用土

Fig. 1 Test soil: silty clay (a) and sandy soil (b)

表1 试验土样的粒径分布

Table 1 Particle size distribution of test soil samples

土体类型	不同粒径的质量百分比/%			
	<0.075 mm	≥0.075~ 0.25 mm	≥0.25~ 0.5 mm	≥0.5~1 mm
粉质黏土	30.2	12.5	17.4	39.9
砂土	2.0	93.4	2.6	2.0

### 1.2 试验装置

路基土在冻结条件下存在较大的温度梯度,地下水水汽补给的存在与否会影响土体孔隙中的湿度,进而影响水汽向路基顶部迁移聚集并冻结。因此,研究单向冻结条件下非饱和土水汽迁移时分两种情况,一种是不考虑地下水水汽补给的封闭体系,一种是考虑地下水水汽补给的开放体系。基于

此,本文设计了可以模拟不同地下水补水方式的一维土柱水分迁移试验装置,该装置主要由土柱模型、控温系统、补水系统以及温、湿度监测系统等组成,如图2所示。

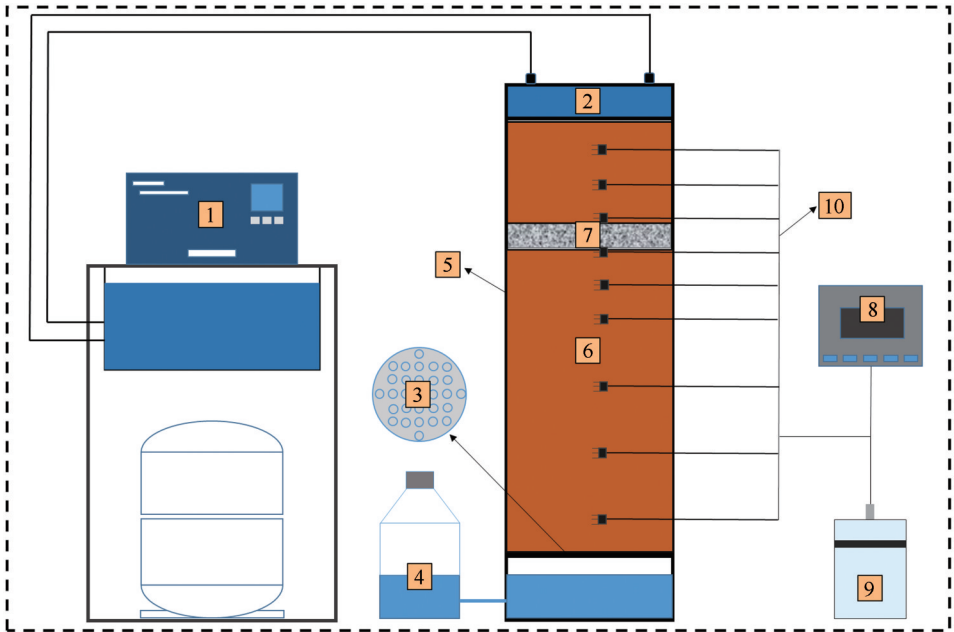


图2 水分迁移试验装置(1. 冷浴,2. 控温板,3. 透水板,4. 马氏瓶,5. 土柱模型,6. 试样,7. 碎石层,8. 温度监测系统,9. 湿度监测系统,10. 温湿度传感器)

Fig. 2 Water migration test device (1. cryostat, 2. temperature-controlled plate, 3. porous disk, 4. Mariotte bottle, 5. soil column model, 6. soil sample, 7. gravel layer, 8. temperature monitoring system, 9. humidity monitoring system, 10. temperature and humidity sensors)

土柱模型高度为75 cm,外径为22 cm,内径为20 cm。距土柱模型底部10 cm处设置透水板,透水板上布置若干个间隔为2 cm,直径为1 cm的圆孔,同时保证具有足够的水汽透过能力和土样承载力。同时,为了探究单纯的水汽补给对土柱顶部土体水分聚集和冻结特性的影响,在距土柱顶部16~19 cm处铺设3 cm厚的碎石层,目的是阻断液态水迁移路径,使碎石层以下土体的水分只以水汽的形式迁移(图2)。土柱模型侧边每隔5 cm布置直径为1 cm的圆孔,用于布置温、湿度传感器。

控温系统由冷浴、连接管及控温板组成,通过控温板将冷浴温度传递至试样顶部,控制试样冻结过程中的温度,使试样顶部和底部形成温度梯度。

补水系统由马氏瓶通过两个连接管与土柱模型相连,在大气压强和液体压强的作用下,使水位自动控制在“连接管一”位于土柱模型内的端口最低处,具体细节如图3所示。在开放体系下,补水系统为土柱模型底部补水,控制水位高度低于透水板高度,用于模拟地下水位深,只有水汽补给的寒旱区的地下水状态。在封闭体系下,土柱模型底部封

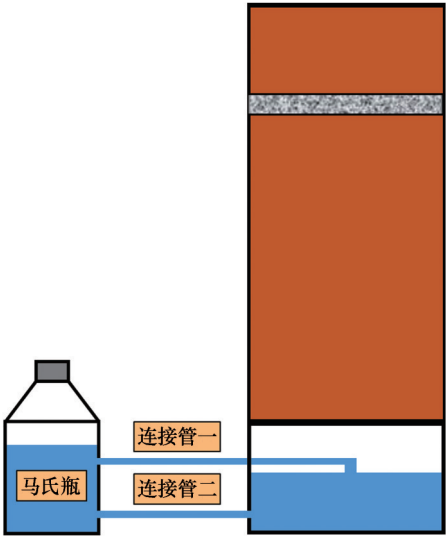


图3 补水装置

Fig. 3 Water replenishing device

闭,用于模拟不存在地下水补给的状态。马氏瓶在试验过程中密封,仅与土柱模型发生水汽交换。

1.3 试验方案

在实际工程中,路基顶部受环境温度的影响率先开始降温,并逐渐向路基深度方向传递,因此,试



验采用单向降温的方式。我国西北寒旱区路基顶部土体的最低气温可达 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,因此通过控温装置调节土柱模型的顶端温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。值得注意的是,土柱顶部的温度为土柱 $5\text{ cm}$ 深度处温度传感器测得的温度。冻结过程中,土柱模型的外侧包裹 $3\text{ cm}$ 厚的保温棉,保证热量只沿轴向传导。同时,将土柱模型置于温度可控的封闭空间,控制土柱模型底部的温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,使土柱内部产生温度梯度。为了分析封闭体系和开放体系以及土性不同的情况下,水汽迁移对土柱顶部水分聚集和冻结特性的影响,设计试验方案如表2所示。

表2 试验方案  
Table 2 Test scheme

土体类型	顶部温度/ $^{\circ}\text{C}$	补水体系	试验时间/d
粉质黏土	$-15$	封闭	30
粉质黏土	$-15$	开放	30
砂土	$-15$	封闭	30
砂土	$-15$	开放	30

#### 1.4 试验过程

①配置最佳含水率的粉质黏土( $14.1\%$ )和砂土( $9.0\%$ )土样,闷料 $24\text{ h}$ ,保证土样含水率均匀。

②将配置好的土样每隔 $5\text{ cm}$ 填筑到土柱模型,分层压实并控制压实度为 $96\%$ 。每层填筑完毕后将土层表面刮毛,以确保层与层之间紧密接触。

③在填筑土柱过程中,分别在距离土柱模型顶部 $5\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm}$ 、 $15\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}$ 、 $25\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm}$ 、 $40\text{ cm}$ 、 $50\text{ cm}$ 、 $60\text{ cm}$ 处理入温、湿度传感器。

④土柱填筑完成后,将控温装置的控温顶板放置土样顶面,确保两者紧密接触。为了保证整个装置的密封性,将传感器与孔道、控温板与土柱模型之间的空隙用玻璃胶密封,防止土柱模型与外界发生水分交换。

⑤对于开放体系的试样,需要利用马氏瓶对土柱模型底部补水。

⑥在土柱模型的外侧包裹 $3\text{ cm}$ 厚的保温棉,用于保证冻结过程中热量沿轴向传导。

⑦实时记录温、湿度监测系统所测的数据。对于开放体系下的试样,还要称量马氏瓶内水分的变化,以获取补水量数据。

⑧由于湿度传感器目前只能监控未冻水含量的数据,要得到土柱实际的水分分布,需要在试验结束后,关闭控温装置,将土柱模型顶部的控温顶板移走,沿着土柱深度方向分层取土样,并采用烘

干法测不同高度土体的实际含水率。

## 2 试验结果

### 2.1 土柱内温度的时程变化

由图4可知,在单向冻结过程中,土柱内温度随时间推移具有相同的变化规律,试样整体温度呈下降趋势。由于热量传递的滞后性,上部土体相比下部土体的温度受控温板影响更大,即温度梯度从土柱底端向顶端逐渐增大。假设温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为冻结温度,土柱中冻结锋面随时间逐渐向下移动。由试件内部冻结深度和冻结速率的时变曲线(图5)可知,冻结区可以分为快速冻结区、过渡冻结区和稳定冻结区。以封闭体系下粉质黏土土柱分析为例,在冻结初期( $0\sim 5\text{ d}$ )属于快速冻结区(距顶板 $0\sim 16.7\text{ cm}$ ),冻结速率变化较大,衰减较为快速,同时冻结深度表现为增长较快。随着时间的推移( $5\sim 20\text{ d}$ ),进入过渡冻结区(距顶板 $16.7\sim 18.2\text{ cm}$ ),冻结速率逐渐向稳定过渡,冻结深度逐渐向下推移。随着冻结的深入( $20\sim 30\text{ d}$ ),试件进入稳定冻结区( $18.2\sim 18.4\text{ cm}$ ),冻结速率较为稳定,变化幅度较小,冻结深度缓慢推进。

由图5可知,同一补水体系下,由于传热系数的差异,砂土相较粉质黏土的冻结深度小,冻结区的温度梯度更大。相同土性不同补水体系下,开放体系相较封闭体系冻结深度小,冻结区的温度梯度更大。

### 2.2 土柱内未冻水含量的时程变化

由图6可知,土柱未冻水含量随时间推移呈现逐渐下降并趋于稳定。未冻水含量的变化与温度场的变化密切相关。试验开始时,未冻区的温度是逐渐下降的过程,未冻水会在水分驱动力的作用下向冷端迁移,未冻水含量减小意味着水分发生迁移进入了冻结区。当冻结锋面逐渐下移,土柱上部未冻区转变为冻结区,未冻水发生冻结相变并快速减小。随后未冻水含量随负温下降呈现缓慢下降的趋势。

另一方面,粉质黏土和砂土土柱在碎石层以下未冻水含量的变化存在差异。砂土土柱碎石层以下未冻水的含量由下到上单调减小,而粉质黏土土柱碎石层以下未冻水含量先减小后增加。在温度梯度的影响下,下层土体的水分会在基质势和水汽压等迁移动力的作用下向冷端迁移。但粉质黏土相比砂土孔隙较小,在碎石层以下的土体中出现了小范围的未冻水聚集。

同时,未冻水还会受到重力势的作用向下迁

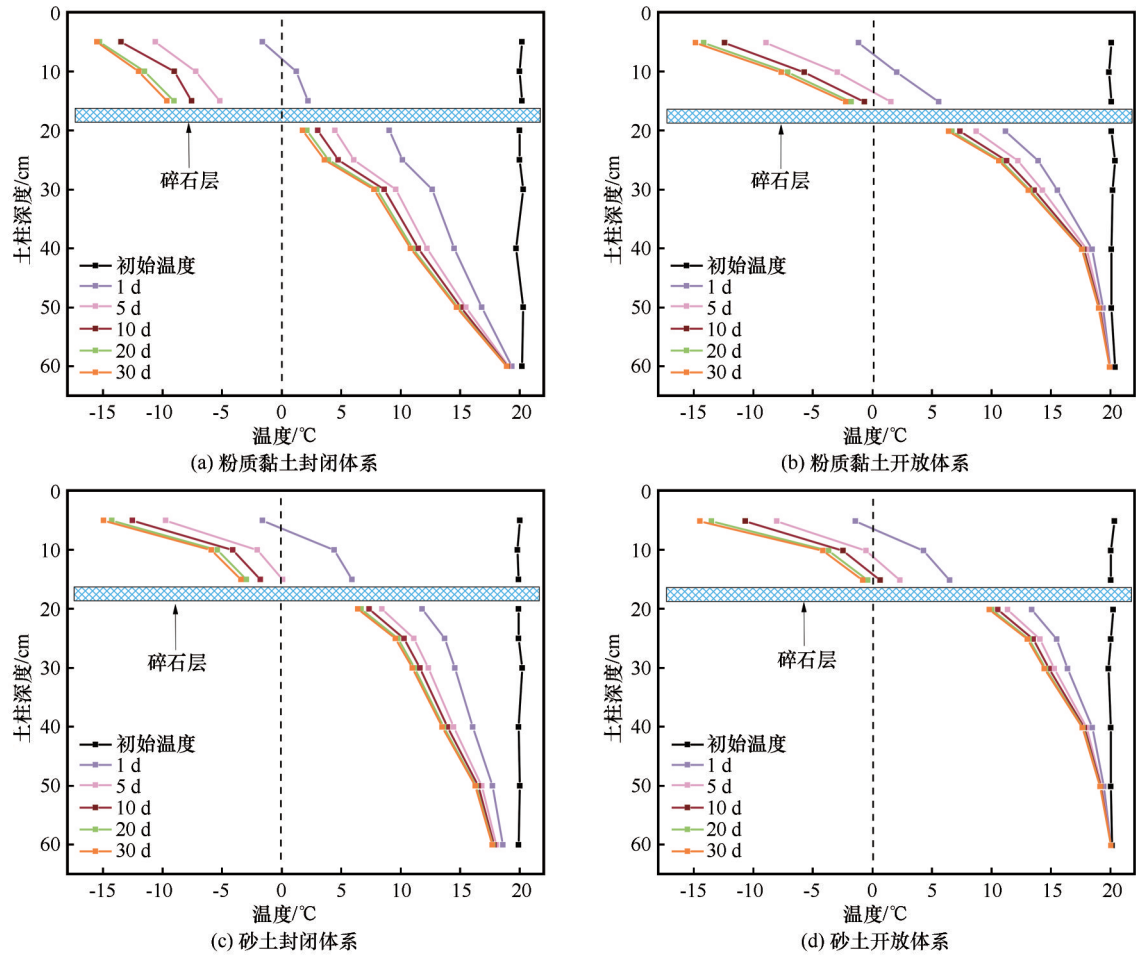


图4 不同时刻温度随试件高度的变化

Fig. 4 Change of temperature with height of the specimen at different times: closed system of silty clay (a), open system of silty clay (b), closed system of sandy soil (c), and open system of sandy soil (d)

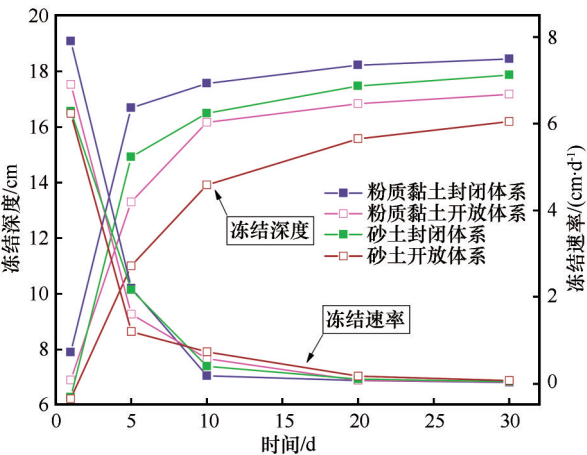


图5 试件内部冻结深度和冻结速率的时变曲线

Fig. 5 Time-varying curves of frozen depth and freezing rate inside the specimen

移。重力势与土柱深度成正比例关系。在封闭体系下,粉质黏土和砂土土柱的水分分布在50~60 cm范围内存在差异。砂土相比粉质黏土持水能力较

弱,受重力势的影响更明显。因此,与粉质黏土不同,砂土在50~60 cm范围内的未冻水含量相较初始含水率大。

2.3 补水量的时程变化

在开放体系下,补水系统对土柱的补水情况如图7所示。由图7(a)可知,试样的补水速率随时间变化可以分为两个阶段:快速补水阶段Ⅰ(0~10 d)和缓慢补水阶段Ⅱ(10~30 d)。粉质黏土土柱的补水速率随时间逐渐减小,并趋向平稳。而砂土土柱的补水速率表现为随时间急剧减小,并逐渐缓慢减小。由图7(b)可知,试验时间内砂土土柱的累积补水量整体大于粉质黏土土柱。但随时间的推移,两者的累积补水量逐渐接近。

2.4 最终的含水率分布

图8为试验结束后土柱的实际含水率和温度沿着土柱深度方向的分布情况。以封闭体系下粉质黏土土柱的水分分布分析为例,相对初始含水率,

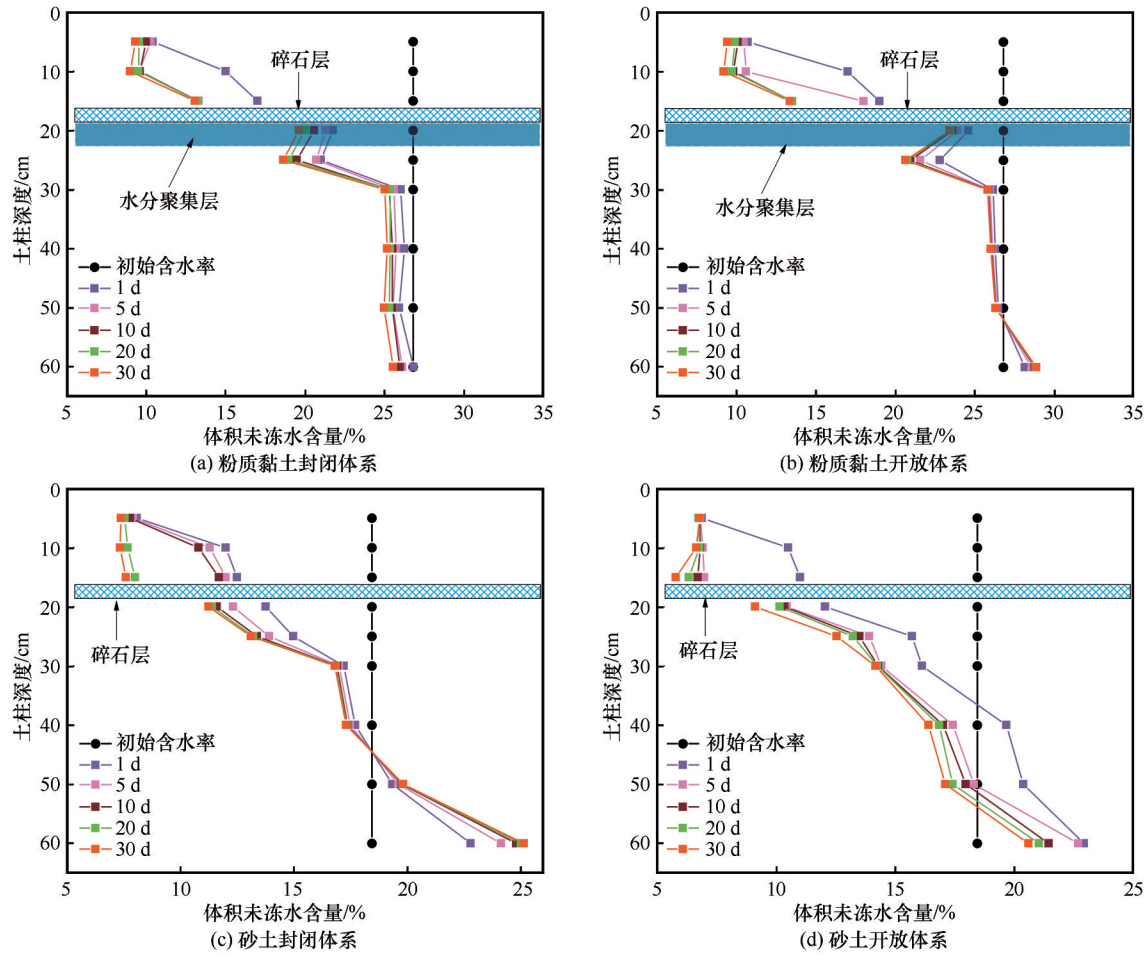


图6 不同时刻未冻水含量随试件高度的变化

Fig. 6 Change of unfrozen water content with height of the specimen at different times: closed system of silty clay (a), open system of silty clay (b), closed system of sandy soil (c), and open system of sandy soil (d)

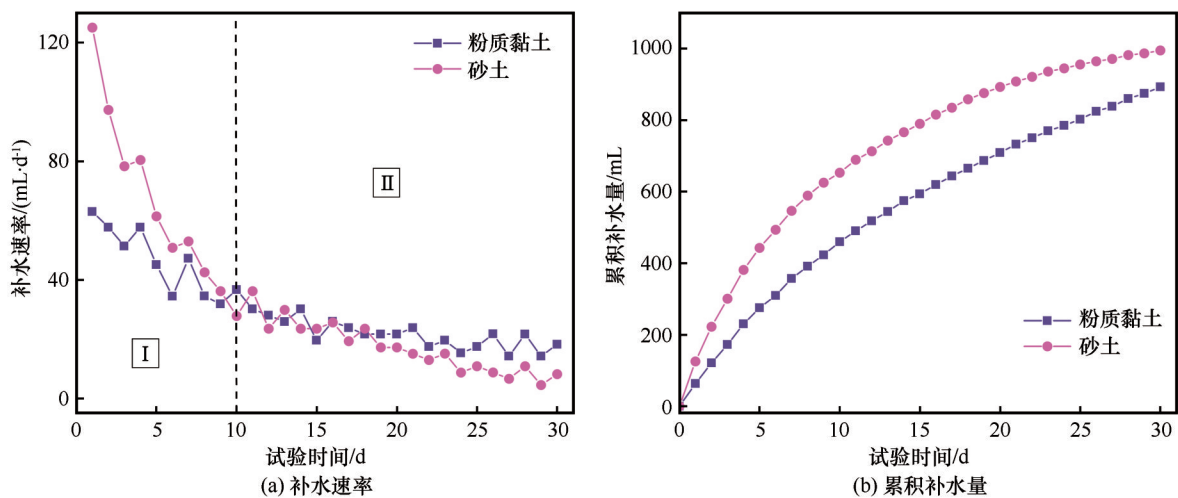


图7 补水时变曲线

Fig. 7 Time-varying curve of water replenishment: water replenishment rate (a) and cumulative water replenishment (b)

粉质黏土土柱 0~2 cm 和 19~65 cm 范围内土体的含水率减小, 2~16 cm 范围内土体的含水率明显增加,

特别是 8 cm 深度处的含水率高达 46.6%, 已经达到饱和状态。



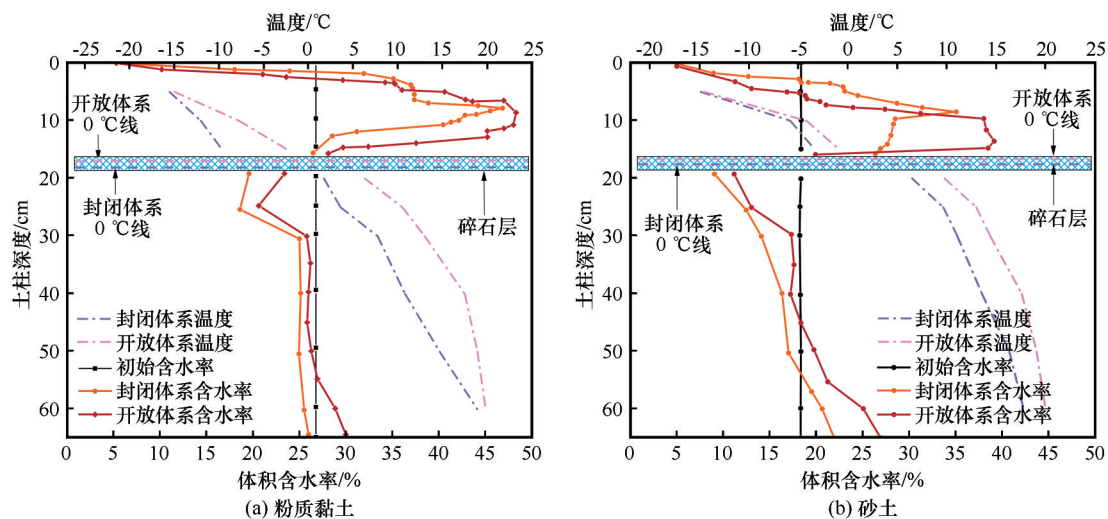


图8 试验前后土柱含水率沿深度方向的分布

Fig. 8 Water content distribution of soil column along the depth direction before and after the test: silty clay (a) and sandy soil (b)

当试验完成后,打开控温板时发现,不论是粉质黏土还是砂土,控温板底板都有一层较厚的霜(图9),而且顶部的土体处于相对干燥的状态(图10)。许多学者在进行单向冻结条件下的水分迁移试验也发现了顶部土体相对初始含水率减小和成霜的现象<sup>[11,23-25]</sup>。待平行试件融化后,再将控温板打开发现顶部的土体达到饱和状态(图11)。将控温板底部的水分收集(图12),发现封闭和开放体系下粉质黏土土柱顶部的控温板分别聚集了83 mL和146 mL水,而封闭和开放体系下砂土土柱顶部的控温板分别聚集了163 mL和279 mL水。



图10 粉质黏土土柱顶部相对干燥的土

Fig. 10 Relatively dry soil at the top of silty clay column



图9 控温板底部的霜

Fig. 9 Frost on the bottom of the temperature-controlled plate

### 3 讨论

#### 3.1 水分迁移机制

单向冻结条件下,水分迁移导致土柱的水分场发生重分布,水分迁移与温度梯度、迁移动力和土性等因素密切相关。以封闭体系下粉质黏土的水分迁移分析为例,在冻结试验开始时,由于控温板



图11 水分重新返回粉质黏土土柱顶部土层

Fig. 11 Water returns to the top soil layer of silty clay column

的快速降温,顶部土体和控温板之间形成了极大的温度梯度。在控温板的抽吸作用下,顶部0~2 cm范围内土体的水汽向上迁移并遇冷相变成霜,使控温板底部发生水分聚集。随着冻结锋面逐渐向下推移,下部未冻区土体的水分逐渐向0°C线迁移聚集并相变成冰。同时,由于碎石层阻断了液态水向上迁移的路径,19~65 cm范围内土体只能以水汽的形

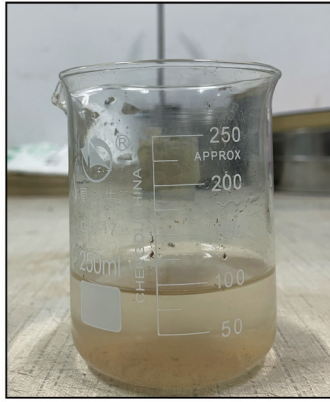


图 12 控温板底部水分收集

Fig. 12 Water collection of the temperature-controlled plate

式向上补给, 导致 2~16 cm 范围内土体含水率增大, 19~65 cm 范围内土体含水率减小。由此可知, 单向冻结过程中, 水分迁移使冻结区形成了两处水分聚集区。

为定量分析土柱的水分迁移机制, 根据土柱实际水分场分布曲线积分获得土柱不同深度处水分

的增减情况, 并考虑控温板水分聚集量以及补水系统的补水量等数据, 对比分析水汽补给对土柱的水分聚集区的影响。提出如下假定: 不论是封闭体系还是开放体系, 水分的迁移总量是不变的, 即补水系统的补水量加上土体水分的减小量应该与控温板水分的聚集量和土体水分的增加量相等; 忽略水分迁移系统中可能出现的土体水分与外界大气相互交换的细小误差。根据以上假定, 得到各处水分的增减变化量如图 13 所示。以封闭体系下粉质黏土土柱分析为例, 由图可知, 控温板底部聚集的水分 (83 mL) 与 0~2 cm 范围的减水量 (79 mL) 大致相同, 这意味着控温板底部水分主要来自 0~2 cm 范围的土体。而碎石层以下水汽补给 (705 mL) 主要影响 2~16 cm 范围土体的水分聚集 (671 mL)。这说明 2~16 cm 范围土体的水分相变成冰会逐渐阻塞土体孔隙, 并逐渐在 8 cm 深度处形成不连通孔隙的界面, 阻碍水分向控温板底部迁移。滕继东等<sup>[19]</sup>也提出水分冷凝和冻结会占据孔隙通道, 会对水分迁移

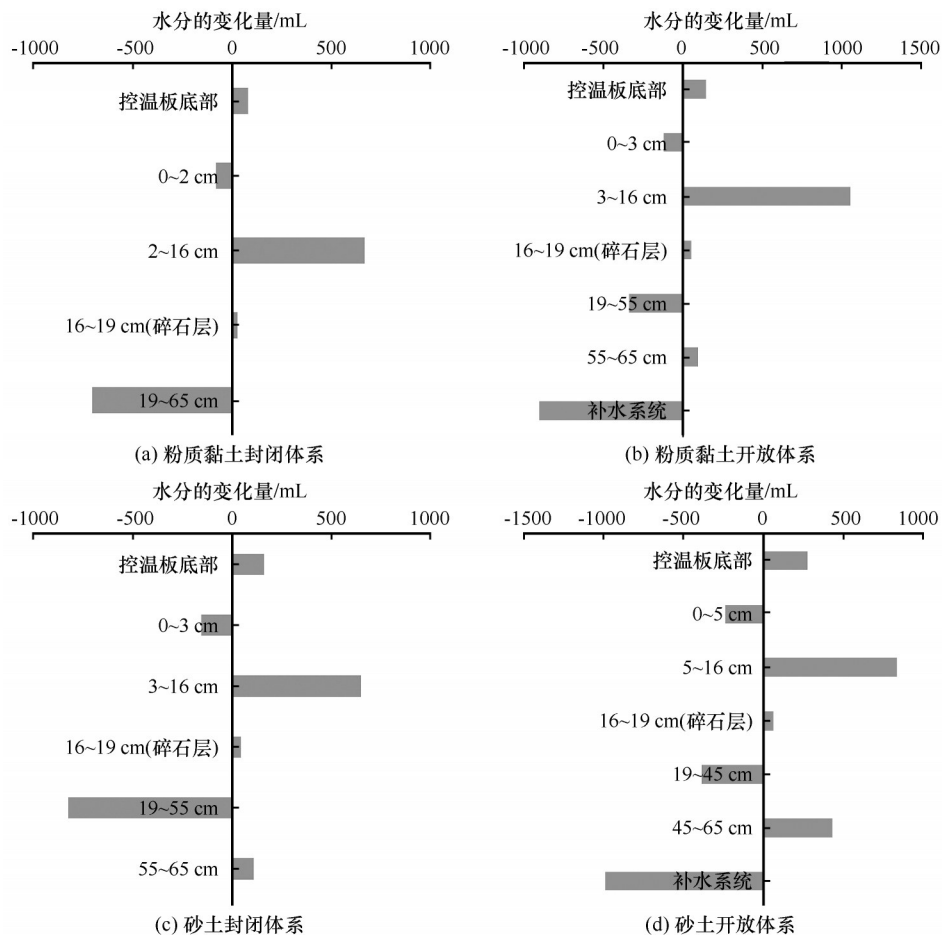


图 13 不同位置含水率的增减变化

Fig. 13 Increase and decrease of water content in different positions: closed system of silty clay (a), open system of silty clay (b), closed system of sandy soil (c), and open system of sandy soil (d)



产生一定的阻碍效应。不连通孔隙的界面犹如形成了新的覆盖层,促进水汽补给相变在新的覆盖层下聚集。

以上分析可知,第一水分聚集区为控温板底部,以霜的形式聚集,主要是由土柱顶部土体的水汽迁移并凝华相变形成。第二水分聚集区为冻结区中能首先形成不连通孔隙的界面两侧,是随着冻结锋面的向下推移,下部土体的水分逐渐向 $0^{\circ}\text{C}$ 线迁移聚集并相变成冰形成,水分主要来自碎石层以下土体水汽向上迁移。

### 3.2 补水体系对水分聚集的影响

开放体系能为土柱提供源源不断的水汽补给,相较封闭体系水分聚集区的水分增加量更多。以粉质黏土土柱分析为例,封闭体系下,两处水分聚集区(控温板底部和 $2\sim 16\text{ cm}$ 范围土体)的增水量为 $754\text{ mL}$ ;而开放体系下,两处水分聚集区(控温板底部和 $3\sim 16\text{ cm}$ 范围土体)的增水量为 $1\,200\text{ mL}$ ,相比封闭体系增大了 $59.2\%$ 。另一方面,补水装置的水汽补给并相变产生了更多的相变潜热,使冻结区的

温度梯度变大,进而使第一水分聚集区对顶部土体水分的抽吸作用更为强烈,土柱上部含水率减小的范围更大,如图8所示。

### 3.3 土性对水分迁移规律的影响

图14为粉质黏土和砂土土柱的水分相较初始含水率的变化幅度和温度分布对比。由图可知,由于砂土对水的吸附能力较弱,在控温板的抽吸作用下,土柱顶部含水率减小的范围更深,第一水分聚集区的水分增加量更大。另一方面,相比粉质黏土,砂土土柱在第二水分聚集区的含水率增加幅度也更大。

结合未冻水含量和补水量的时程变化可以说明相对粉质黏土,砂土具有较大的孔隙结构,连通性较好,更能为水汽迁移提供通道。所以在试验时间内砂土的水分聚集受到碎石层以下水汽补给的影响更明显。但由于砂土持水能力较弱,对水汽补给的需求逐渐减低,所以补水速率呈现逐渐减小的趋势。粉质黏土的持水能力较强,对水汽补给的需求逐渐稳定,因此补水速率也随时间呈稳定的变化趋势。

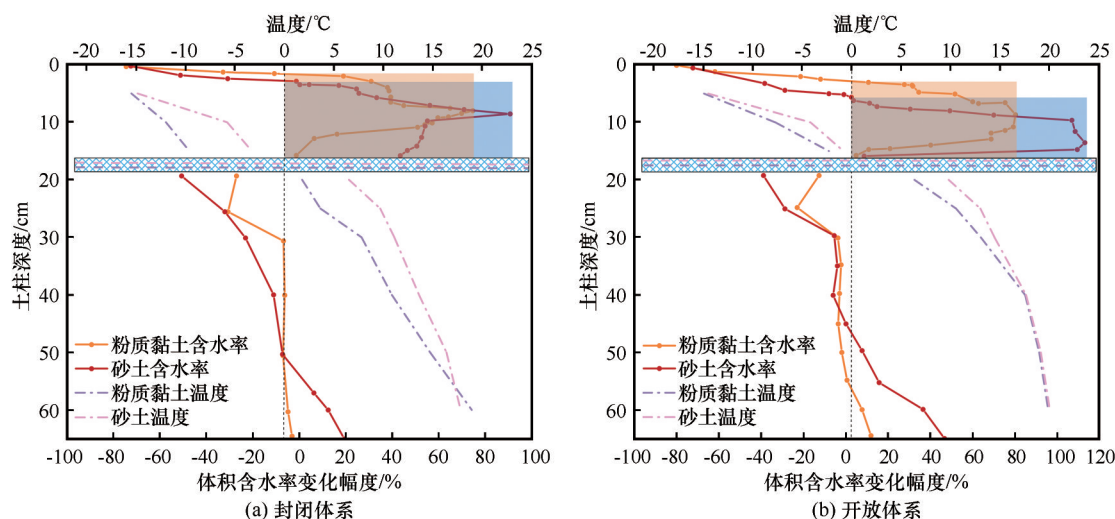


图14 粉质黏土和砂土含水率分布对比

Fig. 14 Comparison of water content distribution between silty clay and sandy soil: closed system (a) and open system (b)

## 4 结论

本文采用室内试验方法模拟了单向冻结条件下,两种典型路基土在封闭和开放补水体系下的水分迁移过程,通过在土柱模型上层位置处设置碎石层,排除液态水补给的影响,探究了在地下水补给方式和土性条件不同的情况下,单纯水汽补给对土柱冻结区水分聚集和冻结特性的影响,并对试验结果进行了定量分析,得到以下结论:

(1)不论是封闭体系还是开放体系,粉质黏土和砂土土柱的冻结区均出现两处水分聚集区,第一水分聚集区为控温板底部,水分主要来源于顶部土体的水汽迁移凝华;第二水分聚集区为冻结区中首先能形成孔隙不连通的界面两侧,水分主要来源于碎石层以下水汽的补给。

(2)相较封闭体系,开放体系更容易造成水分聚集区含水率增大。同时,开放体系增加了水分迁

移产生的相变潜热,使冻结区温度梯度增大,进而造成第一水分聚集区对顶部土体水分的抽吸作用更为强烈。

(3)土体的孔隙结构和持水能力是影响水分迁移的重要因素。相较粉质黏土,砂土介质孔隙较大,能更好地为水分迁移提供通道,水汽补给作用更明显。试验时间30天内,水分迁移造成水分聚集区的水分增加量更多。但砂土持水能力逐渐减弱,对外界补水的需求也逐渐降低。

### 参考文献(References):

- [1] Yang Youhai, Shen Xin, Zhu Shengxian, et al. Experimental study on frost heaving of coarse-grained filling material for Lanzhou-Xinjiang High Speed Railway [J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 1-7. [杨有海, 沈鑫, 朱生宪, 等. 兰新高铁粗颗粒土填料冻胀性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 1-7.]
- [2] Sheng Daichao, Zhang Sheng, He Zuoyue. Assessing frost susceptibility of soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 594-605. [盛岱超, 张升, 贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 594-605.]
- [3] Chang Qixin, Sun Ziyong, Ma Rui, et al. A review of ground-water flow and its interaction with surface water in permafrost region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5): 87-94. [常启昕, 孙自永, 马瑞, 等. 冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5): 87-94.]
- [4] Qi Changqing, Wu Qingbai, Shi Bin, et al. Analysis of thermal state of permafrost under high embankment along Qinghai-Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl 2): 4518-4524. [祁长青, 吴青柏, 施斌, 等. 青藏铁路高路堤下多年冻土热状态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 4518-4524.]
- [5] Ma Wei, Zhang Lianhai, Yang Chengsong. Discussion of the applicability of the generalized Clausius-Clapeyron equation and the frozen fringe process [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 142: 47-59.
- [6] Yao Yangping, Wang Lin, Wang Naidong, et al. Mechanism of forming pot-cover effect and its prevention [J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 1-5. [姚仰平, 王琳, 王乃东, 等. 锅盖效应的形成机制及其防治[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 1-5.]
- [7] Yao Yangping, Wang Lin, Wang Naidong. Analysis of disaster characteristics and cases of pot-cover effect in dry and cold areas [J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 21-24. [姚仰平, 王琳, 王乃东. 干寒区锅盖效应致灾特征及案例分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 21-24.]
- [8] He Zuoyue, Zhang Sheng, Teng Jidong, et al. Vapour transfer and its effects on water content in freezing soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1190-1197. [贺佐跃, 张升, 滕继东, 等. 冻土中气态水迁移及其对土体含水率的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1190-1197.]
- [9] Zhang Sheng, Teng Jidong, He Zuoyue, et al. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 126: 1-9.
- [10] Zhou Jiazuo, Wei Changfu, Li Dongqing, et al. A moving-pump model for water migration in unsaturated freezing soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104/105: 14-22.
- [11] Zhang Yuzhi, Wang Tianliang, Kou Xiaokang, et al. Liquid water-vapour migration tracing and characteristics of unsaturated coarse-grained soil in high-speed railway subjected to freezing and different load types [J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122747.
- [12] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin, et al. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [13] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [14] Taylor G S, Luthin J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 548-555.
- [15] Mao Xuesong, Hou Zhongjie, Kong Lingkun. Dynamic observation and analysis of moisture migration for wind-blow sand in open system during frost [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 202-208. [毛雪松, 侯仲杰, 孔令坤. 冻结条件下开放体系风积砂水分迁移的动态观测及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 202-208.]
- [16] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Analysis on the moisture migration of subgrade soil under effect of temperature gradient [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(4): 150-158. [许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 冻结过程路基土体水分迁移特征分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(4): 150-158.]
- [17] Jackson R D. Temperature and soil-water diffusivity relations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(4): 363-366.
- [18] Wang Tiehang, Zhao Shude. Equation for water vapour transfer in unsaturated soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 18-21. [王铁行, 赵树德. 非饱和土体气态水迁移引起的含水量变化方程[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 18-21.]
- [19] Teng Jidong, He Zuoyue, Zhang Sheng, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: physical mechanism and numerical model for two types of "canopy effect" [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1813-1821. [滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水气迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1813-1821.]
- [20] Xue Ke, Zheng Tao, Zhang Mingli, et al. Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 39-46. [薛珂, 郑涛, 张明礼, 等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 39-46.]
- [21] Li Qiang, Yao Yangping, Han Liming, et al. Pot-cover effect of soil [J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69-71. [李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69-71.]
- [22] Zhang Sheng, He Zuoyue, Teng Jidong, et al. Water vapor transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study on two types of canopy effect [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 961-968. [张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 961-968.]
- [23] Wei Houzhen, Zhou Jiazuo, Wei Changfu, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2547-2552. [魏厚振, 周家作, 韦昌富, 等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2547-2552.]
- [24] Sun Liyuan. Study on unsaturated loess water-heat transfer during freezing-thawing and its simulation by HYDRUS model [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. [孙丽源. 冻融作用下非饱和黄土水热运移规律及其HYDRUS模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.]
- [25] Zhang Lianhai, Ma Wei, Shi Yajun, et al. The modes and its implications of water accumulation near the freezing front during soil freezing with considering ice segregation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1): 31-41. [张莲海, 马巍, 石亚军, 等. 不同成冰机制下冻结锋面附近水分积聚模式及其工程环境意义[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 31-41.]

## Study on water migration behavior of unsaturated soil under unidirectional freezing condition

ZHANG Jianxun<sup>1</sup>, MAO Xuesong<sup>1</sup>, LIU Feifei<sup>1,2</sup>, WU Qian<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of groundwater and soil properties on the water migration pattern during the freezing process of subgrade, water migration tests of unidirectional freezing conditions were conducted for open systems and closed systems of silty clay and sandy soil. By setting a gravel layer in the soil column, blocking the liquid water migration path, monitoring the hydrothermal changes of the soil column during the freezing process, and combining the frozen depth, freezing rate curve, water content distribution curve, and water replenishment time-varying curve of the soil column, the effect on the water accumulation and freezing characteristics of the top of the soil column when only water vapor was replenished was analyzed. The experimental study found that the freezing zone can be divided into a fast freezing zone, a transition freezing zone, and a stable freezing zone. The change in unfrozen water content was closely related to the change in the temperature field. At the beginning of the test, the temperature in the unfrozen zone was gradually decreasing, and the unfrozen water migrated to the cold end under the action of the water driving force, and the decrease in unfrozen water content meant that the water migrated into the frozen zone. When the freezing front gradually moved down, the unfrozen zone in the upper soil layer transformed into the frozen zone, and the unfrozen water underwent a freezing phase change and decreased rapidly. Subsequently, the unfrozen water content showed a slow decreasing trend with the negative temperature. On the other hand, there was a difference in the change of unfrozen water content below the gravel layer between the silty clay and sandy soil columns. Due to silty clay having smaller pores compared with sandy soils, a small accumulation of unfrozen water occurred in the soils below the gravel layer. At the same time, unfrozen water also migrated downward by the gravitational potential. The sandy soil has a weaker water-holding capacity compared to the silty clay and was more significantly influenced by the gravitational potential. Therefore, unlike the silty clay, the unfrozen water content of the sandy soil in the range of 50~60 cm was large compared to the initial water content. In both closed and open systems, silty clay and sandy soil columns formed two water aggregation zones in the frozen zone. The first water aggregation zone was the bottom of the temperature-controlled plate, which was aggregated in the form of frost, mainly formed by the water vapor migration and condensation phase change of the top soil of the soil column. The second water aggregation zone was formed by the liquid-vapor mixing migration in the freezing zone: with the downward push of the freezing front, the interface of disconnected pores was formed, liquid water migrates and aggregated toward the 0 °C ice front and turned into ice, and the migration path of water vapor was blocked and condensed into ice, re-



sulting in a significant increase of water content in this area. The open system resulted in greater water gain in the two water aggregation zones compared to the closed system. In addition, the open system increased the latent heat of phase change from water vapor migration, which increased the temperature gradient in the freezing zone and in turn caused the first water accumulation zone to have a stronger pumping effect on the top soil water. The water supplement rate of the specimen with time can be divided into two stages: rapid recharge stages I (0~10 d) and slow recharge stage II (10~30 d). The water supplement rate of the silty clay column gradually decreased with time and tended to be stable. However, the water supplement rate of the sandy clay column showed a sharp decrease with time and gradually decreased slowly. Compared with the silty clay, the sandy soil had larger pores, and the effect of water vapor recharge on the water aggregation area was more obvious during the test time; however, the water vapor recharge rate gradually decreased with time due to the weakened water holding capacity of the sandy soil.

**Key words:** unidirectional freezing; unsaturated soil; water vapor migration; open system; closed system; unfrozen water

(责任编辑: 温智)