

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1010

CHENG Boyuan, ZHANG Yuzhi, WANG Tianliang, et al. Research on soil water-vapor migration measurement system under freeze-thaw cycles based on fluorescein and image tracking technology[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):322-330. [程博远, 张玉芝, 王天亮, 等. 基于荧光素和图像追踪技术的冻融循环作用下土体水汽迁移量测装置系统研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):322-330.]

# 基于荧光素和图像追踪技术的冻融循环作用下 土体水汽迁移量测装置系统研究

程博远<sup>1,2</sup>, 张玉芝<sup>3,4</sup>, 王天亮<sup>1,5</sup>, 温 安<sup>3</sup>, 尹赵爱<sup>1,5</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000; 3. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 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; 5. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘 要:** 寒区高速铁路基中粗颗粒填料水汽迁移可能是路基冻胀变形的来源, 直观追踪冻融循环作用下土体水汽迁移过程, 有助于研究水分迁移规律, 为冻胀机理提供理论依据。基于此, 提出采用荧光素示踪和图像处理技术方法, 直观观测土体中水汽迁移的规律。首先开展荧光素示踪、蒸发试验及图像处理技术的研究, 证明示踪剂可实现冻结锋面及外界液态水迁移的追踪; 而后通过改进试样筒, 加入液态水隔离装置等实现可视化装置系统的研发; 最后通过开放和封闭条件下水汽混合迁移和气态水迁移试验, 实现了水汽迁移过程的可视化追踪。验证性试验结果表明: 在开放条件下, 该试验装置能够有效追踪外界水迁移的时程变化; 在封闭条件下, 该装置能够实时监测冻结锋面的变化过程。在粗粒土中, 气态水迁移是存在的, 且水分重分布主要由气态水迁移引起。

**关键词:** 水汽迁移; 气态水迁移; 荧光素示踪; 图像处理; 冻融循环

**中图分类号:** TU411; TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0322-09

## 0 引言

目前, 我国高速铁路已经形成了世界上最大规模和最高运营速度的高速铁路网, 已建成运营的哈大、哈齐、京沈、兰新等高速铁路全部或者大部分穿越了深季节冻土区。尽管事先采取了各种工程措施, 寒区路基的冻胀问题仍普遍发生<sup>[1-3]</sup>。Zhang等<sup>[4]</sup>通过对哈大高速铁路的现场监测发现, 路基隆起主要发生在被广泛认为不易受冻结影响的粗颗粒填料中, 并认为冻胀是列车循环动载引发的孔隙水流动诱发的。张玉芝等<sup>[5]</sup>通过对哈大高铁进行现场监测并建模分析, 认为路基中水分重分布引起的土体冻胀率、融沉压缩系数等的变化是影响季节冻土区高速铁路路基变形稳定性的主要原因。

对于高速铁路基填筑的粗颗粒填料而言, 水汽迁

移推动粗颗粒土中细粒结构变形从而发生冻胀, 可能是非饱和粗颗粒填料冻胀变形来源的合理解释<sup>[6-9]</sup>。早期针对农业中的水分迁移现象, Bouyoucos<sup>[10]</sup>通过试验发现在温度梯度作用下, 非饱和土中存在少量的气态水由高温向低温迁移的现象。Bouyoucos等<sup>[11]</sup>、Lovell<sup>[12]</sup>提出当土冻结时, 不是所有的水在土壤孔隙以正常的凝固点发生相态变化, 这意味着液态水、冰和气态水可以并存于冻土, 而具有流体性质的液态水 and 气态水都有可能在土中发生迁移, 导致水分的重分布。目前, 有关冻融循环作用下水分迁移的研究多以细粒土液态水迁移为主, 姚仰平等<sup>[13]</sup>、罗汀等<sup>[14]</sup>分别对细粒土水分迁移中的锅盖效应做出相应的试验和数值模拟研究, 认为冻结状态下水汽迁移并冻结成冰, 顶部和冻结锋面处含

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708369); 河北省自然科学基金项目(E2017210110); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLPSE201711); 中国博士后科学基金项目(2018M633607)资助

作者简介: 程博远, 硕士研究生, 主要从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: 18330163225@163.com

通信作者: 张玉芝, 副教授, 主要从事冻土力学与路基稳定性分析研究. E-mail: zhangyuzhi@stdu.edu.cn

水量增加明显。这说明气态水迁移存在于细粒土中,且低温环境可以实现水分三种相态的转变。但目前较少有研究涉及粗粒土中水汽迁移<sup>[15-16]</sup>,因此冻融作用下粗粒土中气态水迁移的存在性和相关规律至今没有形成共识,缺乏可行的水汽迁移检测装置及试验方法也是限制这一类研究的重要因素。

可视化的装置系统,可以实时追踪到水分在整个试样中的迁移过程以及追踪冰晶的形成过程,能够更直观地观测到冻融作用下土中水分的迁移及聚集。基于此,国内外学者研发了一系列新的室内试验装置和试验方法,并据此提出了相应的水分迁移理论和假设<sup>[17-19]</sup>。王永涛等<sup>[20]</sup>研发了基于数字图像技术的土冻胀试验系统,利用该系统并结合图像处理技术,对青藏粉土的冻胀发展过程和冰分凝过程进行了分析,追踪到了土样中冰晶和裂缝的形成和发展过程。周金生等<sup>[21]</sup>利用图像二值化处理过程,实现了对冻结过程中分凝冰演化规律及冻结边缘特征的研究。Xia<sup>[22]</sup>使用荧光素标定的方法对细粒土中的冻胀进行了研究,实现了细粒土中液态水迁移路径的追踪,表明荧光素可以有效追踪水分的变化过程。

本文针对冻融作用下粗粒土水汽迁移的可视化追踪需求,提出基于荧光素作为示踪剂的试验方法,使用改造过的双层中空有机玻璃筒作为容器以隔绝外部环境温度影响,增设液态水隔离装置、图像采集系统等,并开展了一系列可行性试验,验证了所提出试验方法和装置系统的有效性。

## 1 水汽迁移试验方法

### 1.1 水汽迁移试验可视化关键技术

传统的水分迁移试验缺乏可视性,无法直观地观察水分的变化规律。荧光素示踪剂( $C_{20}H_{12}O_5$ )<sup>[19,22]</sup>在紫光灯下,未冻区呈现黄绿色,冻结区呈现深褐色。在水中掺入荧光素示踪剂,利用图像采集系统,可实现实时追踪水分及冻结锋面的迁移过程。

#### 1.1.1 示踪剂示踪技术的应用

为了验证荧光素示踪剂在水汽混合迁移试验中的可行性,本文分别对 AB 填料、标准石英砂、粉质黏土做了追踪试验。AB 填料取自哈齐客专路基的基床 A、B 组填料<sup>[23-24]</sup>,其中  $0.075 < d_{10} < 0.25$ ,取  $d_{10}=0.1$ ,  $d_{30}=1$ ,  $d_{60}=5$ ,  $C_u=50$ ,  $C_c=2$ ,粒径大于 2 mm 的土占 50% 以上,属于细角砾石,级配良好,为 A1 填料,颗粒组成如图 1 所示。

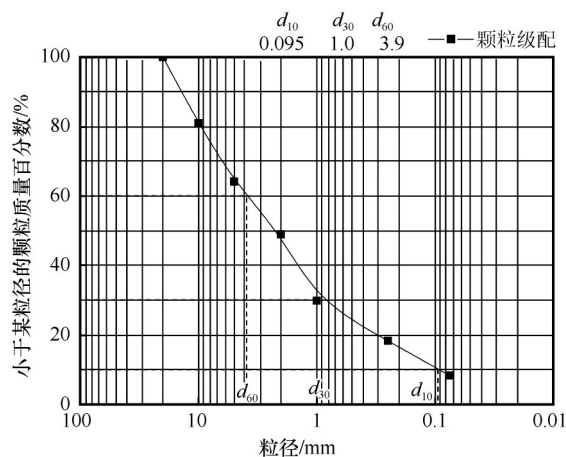


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve

用渗透试验的方法,分别使用上述不同土质的土制成圆筒状试样。连接管上方接到静脉滴注吊瓶,下方连接试样底部,在静脉滴注吊瓶中加入  $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的荧光素,控制荧光素溶液注射速度,使其能够清晰追踪水分迁移过程,打开紫光灯,观察渗透情况。

图2为粉质黏土的示踪剂适用性试验。在试验过程中,可见带有荧光素示踪剂的水分向上迁移,在紫光灯的作用下,能够清晰地看见黄绿色水分的迁移路径。在 AB 填料和标准石英砂的试验中也可以观察到相似的现象,不再赘述。这说明利用  $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的荧光素示踪剂追踪液态水的迁移,并利用紫光灯和相机记录此过程的方法是可行的。

而且通过试验证明,在试验过程中,水分蒸发不会带走荧光素溶液的溶质。如图3所示,1号杯中放置荧光素溶液,2号杯中放入拌和荧光素溶液的土,杯子上面放置玻璃板,底部加热蒸发后,放置在白纸上的玻璃板可以看到,蒸发的水在玻璃盖上液化后没有颜色。由此可知,水分蒸发过程不会带走溶质,因此在液态水迁移试验中,蒸发不会造成荧光素溶液的迁移,荧光素示踪剂能够实现开放补水下冻土中液态水迁移过程的观测。

此外,根据冻结温度测试结果,在粗粒土中,无论是否加入荧光素,土体的冻结温度不会发生变化,而少量的荧光素并不会改变水的密度。所以,荧光素的加入不会改变水分迁移的过程和冻结时间等。

#### 1.1.2 图像处理技术

为了实时追踪到水分迁移过程,本文增设了图像采集装置。图像采集装置由工业相机及支架、紫



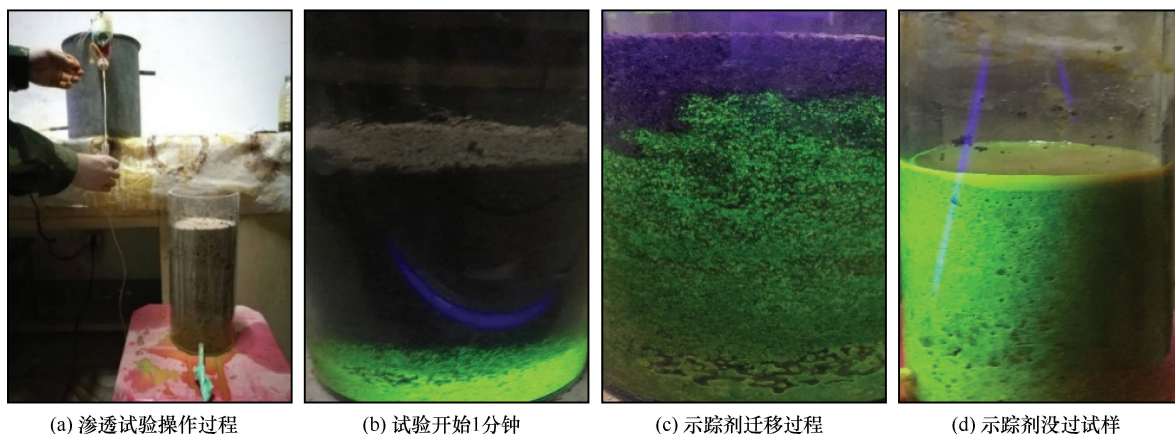


图2 荧光素示踪剂适用性试验

Fig. 2 Applicability test of the tracer for silty clay: penetration test operation (a), 1 minute from the beginning of the test (b), tracer migration process (c), and sample submerged by the tracer (d)

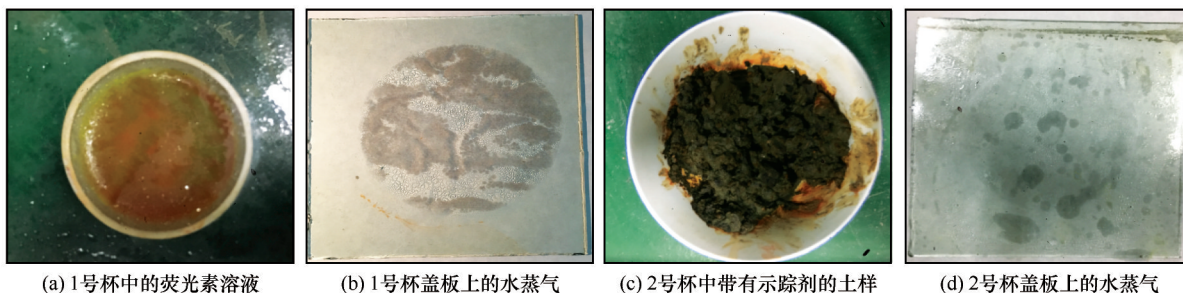


图3 荧光素溶液蒸发试验

Fig. 3 Photos showing the evaporation test of fluorescein solution: tracer in the No. 1 cup (a), water vapor on the No. 1 cup cover (b), soil samples with tracer in the No. 2 cup (c), and water vapor on the No. 2 cup cover (d)

光灯、补光灯、图像处理终端组成。根据试样高度调整试样与工业相机之间的距离、相机的曝光时间、光圈等参数,根据光线需要调整补光灯和紫光灯亮度。此外,工业相机镜头前需加装滤光镜,以减少紫光灯的反射所造成的干扰。工业相机连接PC端,根据试验需要按一定时间间隔自动采集图像。图像采集完成后,再利用MATLAB和Photoshop等软件对图像进行以下处理:

#### (1) 裁剪

根据试验要求裁剪图像,使照片画幅内有用信息量最大化。

#### (2) 调整参数和重要信息凸显

由于图像采集过程中难以直接使相机参数最优化,为了更好地从图形中获取信息,后期利用Photoshop和MATLAB对图像进行统一的参数调整,如亮度、对比度等,并对需要突出的部分进行加强处理,目的是凸显有用信息。例如使湿润土体和干燥土体的对比度更明显等,并不会改变图像的结构,统一调整保证了每幅图像的处理过程一致。

## 1.2 土体冻结锋面变化追踪

应用荧光素示踪技术和图像处理技术的试验方法,可有效追踪到水分的迁移过程。1号试样采用标准石英砂作为试验材料,初始含水率6%,在封闭条件下进行单向冻结。首先将荧光素示踪剂按 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 融入水中,并将带有荧光素示踪剂的水按6%的初始含水率注入土样中,密封静置12 h后搅拌均匀,待土样中水分均匀后,将土分层倒入试样筒内击实并插入温度传感器,盖上顶盘,利用与顶盘和底座分别连通上冷浴系统和下冷浴系统,打开温控箱,对土样按照设定温度 $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行恒温处理,土样内部温度达到设定值后,再将顶盘温度设定为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对试样进行单向冻结,盖上保温盒,同时开启紫光灯及图像采集装置,对试样自动采集图像,之后利用MATLAB和Photoshop对获得的图像进行处理。

试验过程中冻结锋面的变化过程如图4所示。

由图4可见,随着顶盘温度的向下传递,试样的冻结深度越来越深,且随着冻深的增加,冻结锋面

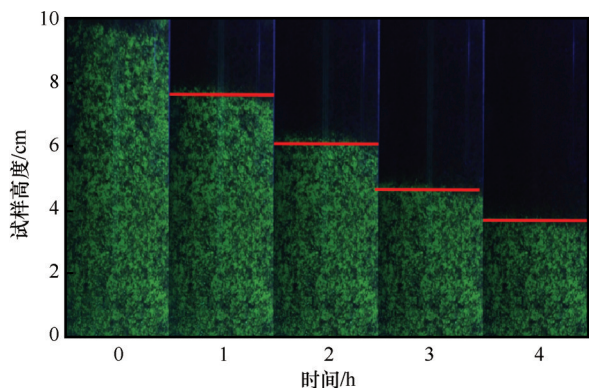


图4 冻结锋面变化

Fig. 4 Variation of the freezing front

向下迁移,利用荧光素示踪剂的显色技术,可以清晰地追踪到冻结锋面的演变过程。在冻结试验过程中,冻结区和未冻区颜色不同,因此荧光素示踪剂可以用于区分冻结区和未冻区的土样。以上试验结果表明,荧光素示踪剂可以用于冻结过程中水分迁移追踪研究。

在封闭环境试验中,荧光素示踪剂随初始含水率拌入土体中,随着自上而下的单向冻结,冻结区的荧光素在紫光灯下不再显色。用这种方法,可以实时追踪到冻结锋面的迁移过程。在开放环境试验中,土中不再掺入荧光素示踪剂,而是将示踪剂掺入马氏补水瓶中。马氏补水瓶重点模拟的是外界水的供给,随着外界水进入土体中,有液态水经过的地方在紫光灯的作用下示踪剂会有明显反光。因此,用这种方法可以追踪到外界液态水的迁移过程。

## 2 试验装置系统

### 2.1 常规水分迁移试验装置

目前国内外关于土体冻结过程水汽迁移的试验研究相对较少,试验设备大多采用传统水分迁移试验装置。传统试验装置系统由试样筒、顶盘、底座、马氏瓶以及冷浴机组成。该装置能够对土体进行常规的冻融试验,并能够实现温度、变形等数据的实时监测,在研究土体冻胀规律试验中起到了重要的作用。

虽然该装置在水分迁移试验中具有一定的实用性,但若要进一步深入研究土体在冻融过程中的水汽迁移规律,实时追踪冻融过程中水分迁移的过程,此装置适用较差。传统冻胀试验装置提供了一个可承载土体的容器、可实现温度控制的冷浴机以及可模拟外界水供给的补水装置,利用保温棉裹住整个

试样,使其在冻结过程中隔绝外界温度,而无法提供一个可视化的环境,让研究人员追踪到土体冻融的实时过程。同时,传统冻胀试验装置无法区分外界水的相态,因此难以单独研究气态水迁移的机制。

### 2.2 基于荧光素和图像追踪技术的土体水汽迁移量测装置

基于荧光素和图像追踪技术的土体水汽迁移量测装置,主要包括双层中空叠环型有机玻璃筒、保温箱、液态水隔离装置、图像采集系统、马氏瓶补水装置、温控装置等。图5为装置示意图。

#### 2.2.1 双层中空叠环型有机玻璃筒

传统的冻胀试验采用普通有机玻璃筒,一方面,由于筒壁较薄且隔热性差,为了减小外界温度对土样冻融的影响,只能在筒壁外围用保温棉将其包裹住,该方法繁琐不便于操作,且不能保证每次试验所隔绝的热量一致,而且还无法满足可视化的要求。另一方面,由于这种筒是一个整体,所以在土样进行冻结的过程中,筒壁会对土体的竖向冻胀产生一定的限制,使试验误差较大。

本文所提出的双层中空叠环型有机玻璃筒,采用双层中空有机玻璃的结构,能够在不裹保温棉的同时隔绝环境温度,实现可视化。该试样筒还采用叠环结构,由若干个小圆柱叠加组成,接触良好,且由于试验筒中为含水率较低的非饱和土,存在空气压力,因此密封性较好。在试验开始前进行了密封性测试,可保证试验过程中无水分流失。因此,在冻土发生冻胀的同时,每一个小圆柱会根据冻胀力的不同产生不同的相对位移,减小筒壁摩擦力对土体竖向冻胀的限制,进一步减小试验误差,使试验条件控制更加精准。结构示意图见图6。

#### 2.2.2 保温箱

利用保温板制成一个箱体结构,罩住试样筒,进一步加强保温,保温箱的其中一侧使用双层真空有机玻璃板代替,以实现可视化功能。同时,保温箱的设置有效地消除了外界光对试样图像采集的影响,使试样光线处于合适且均匀的状态。

#### 2.2.3 液态水隔离装置

为了单独研究气态水在水分迁移中的影响,本文在上述试验装置的基础上增加了液态水隔离装置,如图7所示,装置包括与透明样筒的内壁密封相连的套环,和安装于所述套环上且均匀设有若干个小孔的隔水板,隔水板小孔的直径小于等于1 mm。



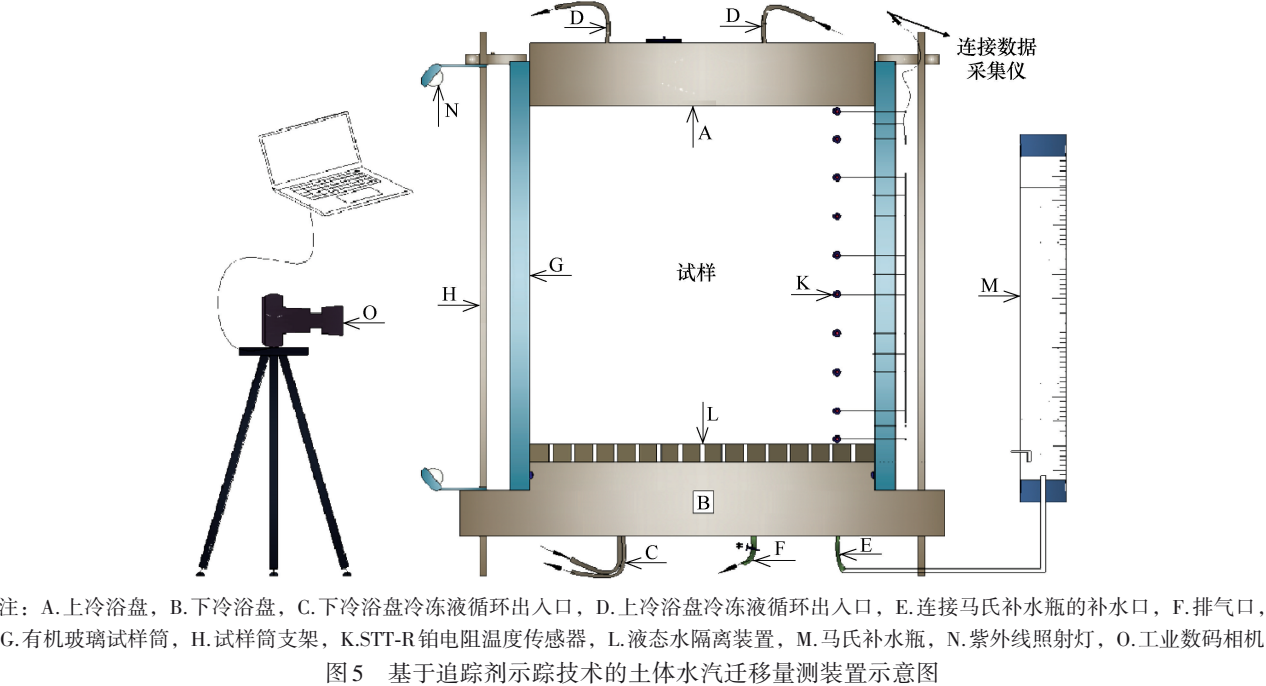
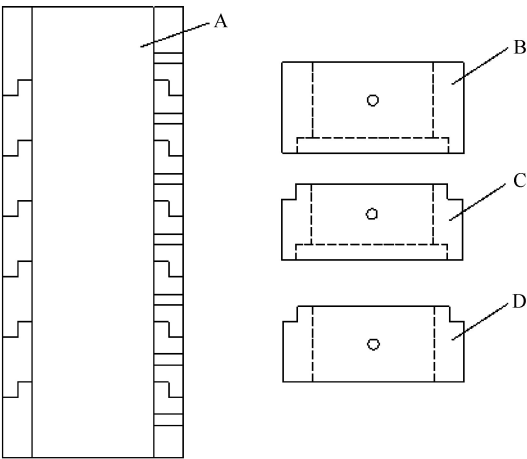


图 5 Schematic diagram of the soil water vapor migration measurement device based on tracer technology



注：A.整体试样筒，B.顶层部件，C.中间部件，D.底层部件  
图 6 双层中空叠环型有机玻璃筒结构示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the double-layer hollow stacked polymethyl methacrylate cylinders

采用液态水隔离装置,空心套环保证外界水和土样不直接接触,可隔绝液态水,而气态水可通过多孔隔水板进入土体。因此,这种装置可以用来研究各种土质气态水迁移的存在性,以及各种条件下气态水迁移所占比重。液态水隔离装置是独立结构,因此是否设置隔断层、设置位置和数量都可以根据试验方案自行安排,具有较强灵活性,能够满足不同的试验需求。利用气态水迁移所到位置土体颜色变深的规律,使气态水的迁移过程、路径、速率能够被记录下来,从而实现气态水迁移的动态追



图 7 隔水板  
Fig. 7 The water separation

踪;采用示踪剂标记外界液态水,由于荧光素显色不因浓度变化或者量的变化而改变,因此水分迁移过程中,有荧光素标记的即为液态水的迁移,没有荧光素标记且土体颜色随迁移过程变深的即为气态水的迁移,从而能够区分迁移过程中的液态水和气态水。

3 土体水汽混合迁移与气态水迁移过程分析

3.1 土体水汽混合迁移追踪试验

2号试样采用AB填料作为试验材料,在开放条件下进行单向冻结。烘干试样,控制初始含水率近似为0,分层击实填入试样筒。后续准备过程与1号

试样相同,不设置隔水层。顶盘温度 $-10^{\circ}\text{C}$ ,底盘温度 $+5^{\circ}\text{C}$ ,环境温度 $+5^{\circ}\text{C}$ 。开放条件下,设置马氏瓶模拟外界补水,荧光素溶液放入马氏瓶中标记外界水。

2号试样利用荧光素示踪技术可以实时追踪到外界液态水的迁移路径和迁移速率,如图8所示。

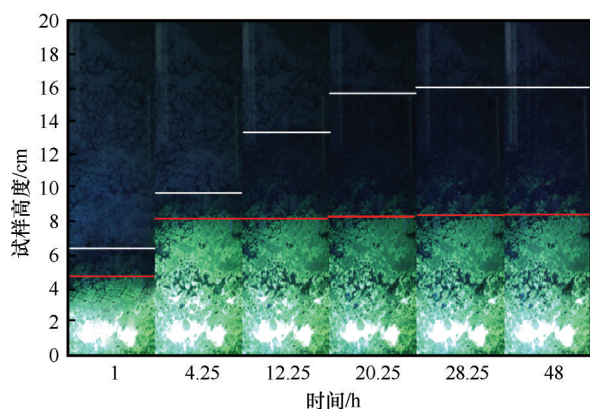


图8 外界液态水迁移过程图像

Fig. 8 Images showing the external liquid water migration

图8中绿色反光为外界液态水迁移过程,可以看出,在这组试验中,外界液态水只能迁移到8 cm左右高度便基本稳定,说明外界液态水对AB填料的影响范围很有限,由图可见,荧光素以上部分土体颜色较深,这是由于气态水迁移并冷凝成液态水所致。而图中标注白线的位置为土体的湿润锋面,即干燥土体与湿润土体分界线。由图8可见,在粗粒土中,气态水迁移比液态水水迁移的影响范围更大。

图9为2号试样最终时刻含水率分布图。试验结束后,2号试样中含水率明显增大,而2号试样的

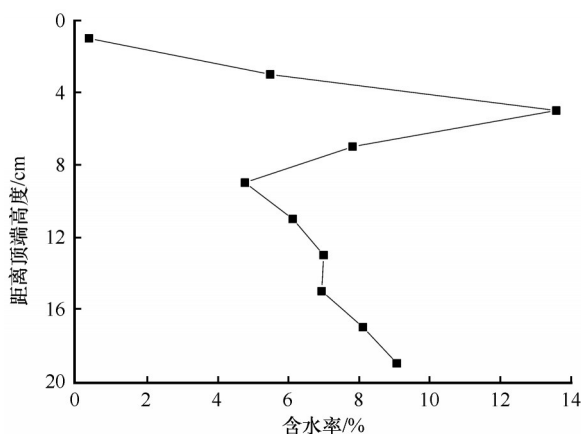


图9 2号试样试验最终时刻含水率分布

Fig. 9 Water content profile of the Specimen 2 at the end of the test

初始含水率近似为0,因此可排除内部水分迁移的可能性,该试样中水分的增加主要是由外界气态水迁移所致,也就是说,当含水率为0时,AB填料中确实存在明显的气态水迁移现象。

### 3.2 土体气态水迁移追踪试验

3号试样同样采用AB填料作为试验材料,初始含水率控制、制样及试验过程同2号试样,不同的是在试样底层设置隔断层,隔绝外界液态水,只允许外界气态水通过。顶盘温度 $-10^{\circ}\text{C}$ ,底盘温度 $+5^{\circ}\text{C}$ ,环境温度 $+5^{\circ}\text{C}$ 。

图10为3号试样的试验图像。

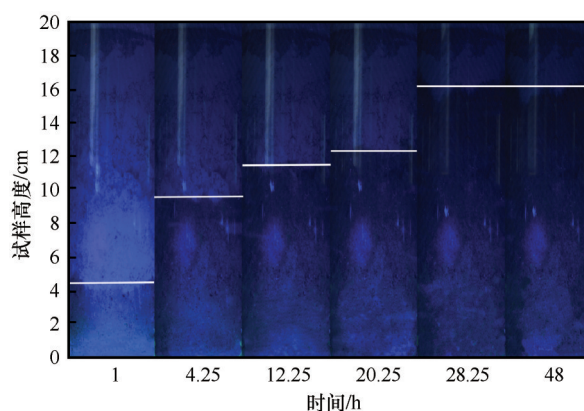


图10 气态水迁移过程图像

Fig. 10 Images showing the vapor migration

3号试样和2号试样在冻结时能观察到气态水迁移到的区域有颜色加深的现象,这是因为这两组试样初始含水率均近似为0,气态水液化成液态水,干土变为湿土,所以颜色会加深。这也证明了气态水迁移的存在性。

由图11可见,各点处含水量均明显增大,无论

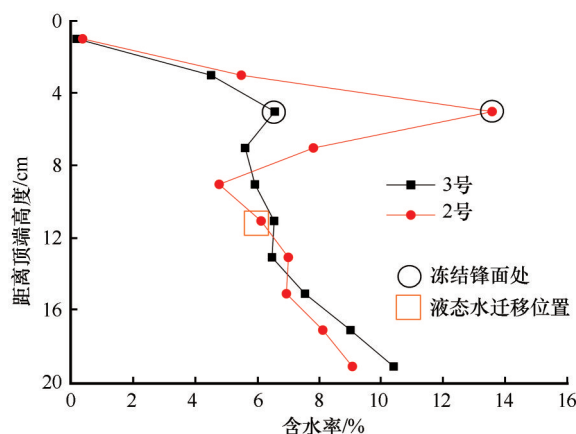


图11 2号和3号试样试验最终时刻含水率分布

Fig. 11 Water content profiles of Specimens 2 and 3 at the end of the test

是水汽混合迁移还是气态水迁移,都会明显增加土中的含水量。根据温度传感器实测数据,结合拆样时试样冻结位置确定冻结锋面,冻结锋面位置含水率增大较多。由图中液态水迁移位置可见,荧光素示踪剂最终达到的高度是距离试样底端 80 mm 的位置,这说明气态水迁移有一定的影响范围,且仅存在于试样下半部分,而试样上半部分的水分重分布,主要由气态水迁移所致。

在此认为 2 号和 3 号补水量的差值为试样液态水迁移量。图 12 为 2 号和 3 号两个试样补水量随时间的变化,从此图可知,整个水分迁移过程中,外界补水中气态水迁移比重较大。2 号试样初始的水汽混合迁移以气态水为主,迁移速率较快,4 h 后,液态水迁移量增加。

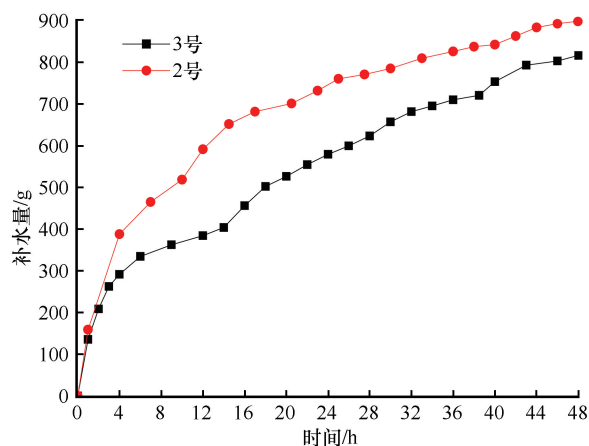


图 12 2 号和 3 号试样补水量随时间变化

Fig. 12 Water replenishment changing with time of Specimens 2 and 3

## 4 结论

本文在传统冻胀试验装置基础上对装置进行开发创新,结合示踪剂追踪技术和图像处理技术提出了基于该装置系统的试验方法,并建立了基于荧光素示踪的水汽迁移量测装置系统,开展了试验方法和装置系统的验证性试验,取得了以下成果与结论:

(1)开发的装置系统主要包括双层中空叠环型有机玻璃筒、保温箱、液态水隔离装置、图像采集装置系统等。该装置系统能够在水分迁移相关研究中发挥较大的优势,结合示踪剂追踪技术和图像处理技术,能够满足现阶段水分迁移及其他冻胀相关试验研究的要求。

(2)提出的试验方法主要包括利用荧光素示踪

剂在不同条件下有不同显色的特性对液态水进行追踪,从而能够追踪到冻结锋面的演变过程和外界水的迁移规律。利用图像处理的技术自动采集图像,并利用图像处理手段发掘图像中更多的有用信息。利用隔断层分别研究液态水迁移和水汽混合迁移对水分重分布的影响,进一步揭示不同土质冻融过程中水分迁移的机制。

(3)基于建立的装置系统,研究了土体在冻结过程中的冻结锋面的迁移过程和外界水的补给过程,验证了气态水迁移在粗粒土中的存在性。

## 参考文献(References):

- [1] Niu Fujun, Li Anyuan, Luo Jing, et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133: 7-14.
- [2] Shi Gangqiang. Research on frost heave and engineering countermeasures of high-speed railway subgrade in severe cold area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [石刚强. 严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [3] Zhang Xianjun. Analysis of frost heave laws in subgrade on Harbin-Dalian high-speed railway and its influence factors[J]. Railway Standard Design, 2013(7): 8-12. [张先军. 哈大高速铁路路基冻胀规律及影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2013(7): 8-12.]
- [4] Zhang Sheng, Sheng Daichao, Zhao Guotang, et al. Analysis of frost heave mechanisms in a high-speed railway embankment [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 520-529.
- [5] Zhang Yuzhi, Du Yanliang, Sun Baochen, et al. Roadbed deformation of high-speed railway due to freezing-thawing process in seasonally frozen regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2546-2553. [张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣, 等. 季节性冻土地区高速铁路路基冻融变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2546-2553.]
- [6] Wang Zhengqiu. Coarse grain soil frost heave classification [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(3): 195-200. [王正秋. 粗粒土冻胀性分类[J]. 冰川冻土, 1986, 8(3): 195-200.]
- [7] Wang Tianliang, Yue Zurun. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359-364. [王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359-364.]
- [8] Wu X Y, Niu F J, Lin Z J, et al. Delamination frost heave in embankment of high speed railway in high altitude and seasonal frozen region [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 25-32.
- [9] Li Anyuan, Niu Fujun, Zheng Hao, et al. Experimental measurement and numerical simulation of frost heave in saturated coarse-grained soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 137: 68-74.
- [10] Bouyoucos G J. Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soils[J]. Journal of Agricultural Research, 1915, 5(4): 141-172.
- [11] Bouyoucos G J, McCool M M. The freezing point method as a

- new means of measuring the concentration of the soil solution directly in the soil[J]. Michigan Agricultural Experiment Station Technical Bulletin, 1916, 24: 1-44.
- [12] Lovell C. Temperature effects on phase composition and strength of partially frozen soil[J]. Highway Research Board Bulletin, 1957, 168: 74-95.
- [13] 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.]
- [14] Luo Ting, Chen Han, Yao Yangping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 6-9. [罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6-9.]
- [15] Zhang S, Teng J D, He Z, et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils[J]. Géotechnique, 2016, 66(11): 927-940.
- [16] Teng J, Shan F, He Z, et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand[J]. Géotechnique, 2019, 69(3): 1-9.
- [17] Lay R D. Development of a frost heave test apparatus[D]. Provo, Utah, USA: Brigham Young University, 2005.
- [18] McKnight-Whitford H. Development of an experimental device for monitoring frost heave in soils[D]. Halifax, Nova Scotia, Canada: Dalhousie University, 2013.
- [19] Arenson L U, Sego D C. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(3): 325-337.
- [20] Wang Yongtao, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Development and application of frost heaving experimental system based on the digital image processing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 1047-1056. [王永涛, 王大雁, 马巍, 等. 基于数字图像技术的土冻胀试验系统研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1047-1056.]
- [21] Zhou Jinsheng, Zhou Guoqing, Shang Xiangyu, et al. Application of image processing technology in the study of segregation ice evolution law[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 123-127. [周金生, 周国庆, 商翔宇, 等. 图像处理技术在分凝冰演化规律研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 123-127.]
- [22] Xia Dejun. Frost heave studies using digital photographic technique[D]. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta, 2006.
- [23] Code for design of railway earth structure: TB 10001-2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. [铁路路基设计规范: TB 10001-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.]
- [24] Wu Zhen, Yue Zurun, Wang Tianliang. Test analysis on freezing temperature of fine round gravel soil in Harbin-Qiqihaer Railway[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(1): 37-40. [吴镇, 岳祖润, 王天亮. 哈齐客专细圆砾土冻结温度测试分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(1): 37-40.]



## Research on soil water-vapor migration measurement system under freeze-thaw cycles based on fluorescein and image tracking technology

CHENG Boyuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuzhi<sup>3,4</sup>, WANG Tianliang<sup>1,5</sup>, WEN An<sup>3</sup>, YIN Zhao'ai<sup>1,5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519000, Guangdong, China; 3. Key Laboratory of Structural Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** It is well known that there is the migration of water-vapor in high speed railways mainly causing frost heaving. Visually tracking the process of water-vapor migration in soil under the freeze-thaw cycles is beneficial to study water migration, and it will provide a theoretical basis for studying the mechanisms of soil frost heave. Because of the difference of the structure between coarse-grained soil and fine-grained soil, the traditional theory used to explain the mechanisms of water migration in fine-grained soils is not applicable to coarse-grained soils. The water-vapor migration is highly probably playing an important role in coarse-grained soil, which is different with the fine-grained soil. However, at present, the research on water migration under the action of freeze-thaw cycles mostly involves liquid water migration and fine-grained soil. The researches of the water-vapor migration in coarse-grained soil under freeze-thaw cycles are relatively few. One of the main reasons is the lacking of device which is visible and can track the migration of water-vapor. In this paper, aiming at the visual tracking requirements of water-vapor migration of coarse-grained soil under freeze-thaw action, a test method based on fluorescein tracing and image processing technology is proposed to establish a soil water-vapor migration measuring device system. The modified double-layer hollow plexiglass cylinder was used as a container to isolate the external environmental temperature. A liquid water isolation device, an image acquisition system, etc. were added. The feasibility of the proposed method and device system was verified by the experiment of water-vapor migration and only vapor migration under open and closed conditions. The results show that using the developed device and under the open condition, the process of external water migration can be effectively tracked; and under closed condition, the change process of the freezing front can be monitored in real time. In coarse-grained soil, vapor migration is existing, moreover, the redistribution of water in coarse-grained soil is mainly caused by the vapor migration.

**Key words:** water-vapor migration; vapor migration; fluorescein tracing; image processing; freeze-thaw cycles

(责任编辑: 周国庆; 编辑: 武俊杰)