

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0061

ZHANG Yuzhi, LIU Wenlong, WANG Haiyong, et al. Macro-micro experimental investigation of the initial water content influence on water migration of coarse-grained soil subjected to freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):591-601. [张玉芝, 刘文龙, 王海永, 等. 冻融循环作用下含水率对粗颗粒填料水分迁移影响的宏观试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):591-601.]

# 冻融循环作用下含水率对粗颗粒填料水分迁移影响的宏观试验研究

张玉芝<sup>1,2,3</sup>, 刘文龙<sup>4</sup>, 王海永<sup>4,5</sup>, 张莲海<sup>6</sup>, 陈世杰<sup>6</sup>, 朱晓东<sup>4</sup>

(1. 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; 2. 大型基础设施性能与安全省部共建协同创新中心(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043; 3. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043; 4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 5. 中铁十九局集团有限公司 勘察设计院分公司, 北京 102600; 6. 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)

**摘 要:** 冻融循环作用和初始含水率是影响粗颗粒填料水分迁移特征和冻胀融沉变形的两个主要因素。为明确冻融循环作用下, 不同初始含水率粗颗粒填料的水分迁移特征及微观机制, 采用荧光素为追踪剂, 以CT微观机理观测为研究手段, 开展了不同初始含水率条件下粗颗粒填料的一系列冻融循环试验, 探究了温度场和冻深变化、水分迁移图像、补水量变化、最终含水率分布及CT值变化规律等。试验结果表明, 冻深基本随冻融循环的次数增加不断加深, 初始含水率越大, 不同冻融循环作用下冻深的变化越稳定。外界补水量和液态水迁移高度与初始含水率呈负相关。CT扫描结果分析表明, 经历多次冻融循环后, 试样中的水分迁移导致土体孔隙结构及颗粒构造发生变化, 试样的密度普遍增加, 孔隙率以减小为主, 进而导致土体发生相应变形。

**关键词:** 粗颗粒填料; CT值; 冻融循环; 初始含水率; 水分迁移

**中图分类号:** P642.14    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0591-11

## 0 引言

我国是冻土大国, 季节冻土占国土面积50%以上, 近些年有多条高速铁路穿越季节冻土区。与国外高速铁路建设大国日本、德国等相比, 我国寒区环境和气候条件严酷, 高铁运营速度和平顺性要求也更高。因此, 中国学者开展了大量的室内外试验研究, 提出了一系列的防冻胀技术<sup>[1-2]</sup>保障寒区高铁的运营安全。

季节冻土区高速铁路基采用了级配碎石和粗颗粒填料进行填筑。在以往工程应用和学者的研究中, 认为冻胀率 $\leq 1\%$ 的填料为不冻胀土<sup>[3]</sup>, 因此工程建设中通过颗粒级配选定填料后, 限制细粒含量和初始含水率来控制路基填料质量<sup>[4-6]</sup>。哈大高铁是

世界上第一条在严寒地区开通的高铁, 开通运营后暴露出的路基冻胀问题, 促使研究者逐渐认识到粗颗粒填料填筑的高铁路基变形普遍存在且不可避免<sup>[7-10]</sup>, 以往认为的不冻胀填料并不能完全满足高铁的平顺性和稳定性严格要求。为揭示其冻胀变形机理, 学者们参考“锅盖效应”的发生机制<sup>[11]</sup>, 提出在无砟轨道密闭覆盖层下, 路基填料中可能存在气态水迁移到冻结区域并凝结成冰的现象<sup>[12-14]</sup>, 并认为动荷载可能产生的超孔隙水压会导致一定范围内地下水泵吸到路基冻结区域<sup>[15]</sup>。赵国堂等<sup>[16]</sup>则通过宏观试验研究认为粗颗粒填料中细颗粒的簇团效应是导致其冻胀超限的原因。在诸多学者研究的基础上, 新版规范<sup>[17-18]</sup>考虑了颗粒级配、细粒含量、初始含水率、冻前地下水位距设计冻深的

收稿日期: 2022-01-13; 修订日期: 2022-03-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078312); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708369; 41801277)资助

作者简介: 张玉芝, 副教授, 主要从事冻土力学及路基稳定性研究. E-mail: zhangyuzhi@stdu.edu.cn

通信作者: 王海永, 助理工程师, 主要从事结构设计及研究. E-mail: 1165942187@qq.com

最小距离等因素,对路基填料进行了更为精细的划分。考虑到控制颗粒级配和细粒含量,选好粗颗粒填料后的初始含水率是除土质外最重要的内在影响因素<sup>[19-20]</sup>,张玉芝等<sup>[21-23]</sup>开展系列试验研究了单向冻结以及冻融循环作用和不同冻结模式下粗颗粒土中水汽迁移的变化特征,通过气态水和水汽混合迁移模式的对比组试验说明,在粗颗粒填料冻结过程中水分迁移主要以气态水迁移为主,并且初始含水率对水分迁移量以及水分迁移方式(气态水或液态水迁移为主)存在显著影响。上述研究主要从控制路基冻胀变形的角度出发,对粗颗粒填料的土质及环境因素等开展分析。然而,Miao等<sup>[24]</sup>依据现场监测结果推测,春融初期由于白天融化夜晚冻结的反复冻融循环作用,在含有细粒土和高含水率的粗粒土中形成凝冰,导致此阶段冻胀变形剧烈增长,而后随着温度继续升高,迅速融化下沉。对于无砟轨道覆盖的隐蔽性较强的高铁路基而言,春融期可能在短期内引起较明显的不均匀沉降变形,长此以往,必然影响轨道平顺性和稳定性。

冻融循环作用改变土颗粒的排列和联结,进而影响其物理和力学性质<sup>[25-26]</sup>,并且土体构造的形成与水分的迁移有着密不可分的联系<sup>[27]</sup>。研究土质结构特性的发展变化,可以从本质上揭示土体在不同压力、温度等环境下的行为特征<sup>[28]</sup>。CT扫描可用于探测冻土孔隙、裂隙结构变化,已经形成了较为成熟的理论体系和应用方法。陈世杰等<sup>[29-30]</sup>总结了CT扫描在冻土中的应用现状。Wang等<sup>[31]</sup>通过试样冻结过程图像、试样水热变化过程和CT扫描数据的试验分析表明,未冻区孔隙水迁移至横向裂隙成冰填充并扩展冷生裂隙,造成试样发生冻胀。

综上所述,研究春融期初始阶段反复的短期冻融循环作用下,粗颗粒填料的细观结构如何变化,以及这种变化又是如何影响到水分迁移的特征对研究春融期路基的变形和力学性能非常有必要。CT可实现试样整体扫描,为揭示冻融循环反复作用下,孔隙特征变化对其水分迁移和变形的影响提供了有效的手段。基于此,本文拟开展在短期反复冻融循环作用下,不同初始含水率粗颗粒填料试样的水汽迁移特征的试验研究,并通过CT扫描探究试验前后填料的细观结构特征变化,进而尝试揭示宏观水分迁移特征与细观结构特征变化之间的联系,为明晰春融期路基变形机理提供理论依据。

## 1 试验方案

### 1.1 土体基本物性

根据哈齐高速铁路路基现场设计资料,配制本试验用的土样,如图1所示,细粒含量为5%,为含细粒土砾,填料的颗粒形状为角砾,属于细角砾石,根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)<sup>[17]</sup>规定,本试验采用的粗颗粒填料级配良好,属于A组填料。该填料最优含水率为5.8%,最大干密度为 $2.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。本文中填料干密度取 $1.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,压实系数为0.92。图1中, $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 和 $d_{60}$ 分别为小于该粒径的土含量占总土质量的10%、30%和60%的粒径。

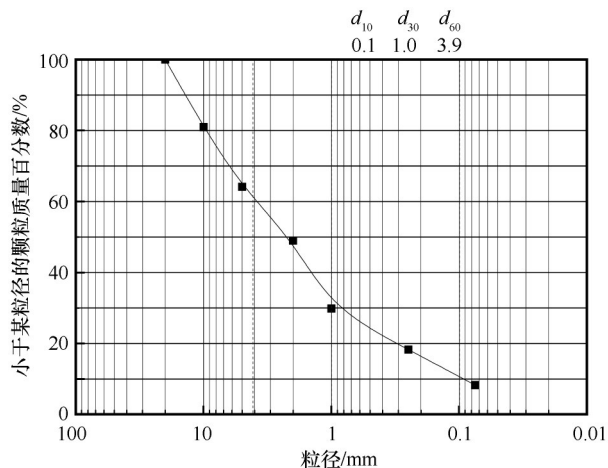


图1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Curve of particle size composition

### 1.2 试验装置

#### 1.2.1 土体水分迁移动态追踪试验装置

本试验采用自主研发的土体水分迁移的动态追踪试验装置,装置由高低温试验箱、亚克力试样筒、图像采集系统、温控系统、外界水分补给系统、传感器及数据采集系统等组成,如图2(a)所示。试样冻融试验前后采用CT扫描试验机进行扫描,CT设备及试样定位如图2(b)、2(c)所示。

采用高低温试验箱来保证试样在环境中的恒定温湿度,试样筒直径选为10 cm、壁厚2.5 cm,高度12 cm。在试样筒的筒侧纵向等间距设置温度传感器插槽,共计10个温度传感器插槽,每个插槽间隔1.1 cm。试样筒材质采用的有机玻璃具有强度高、耐磨、透光性强等性能,有利于水分迁移过程中图像的追踪与采集。单向冻结温控系统精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,上下冷浴盘通过外接冷浴可对试样进行单向(自上而下)冻结,可实现 $-30\sim+50^\circ\text{C}$ 的温度控制。

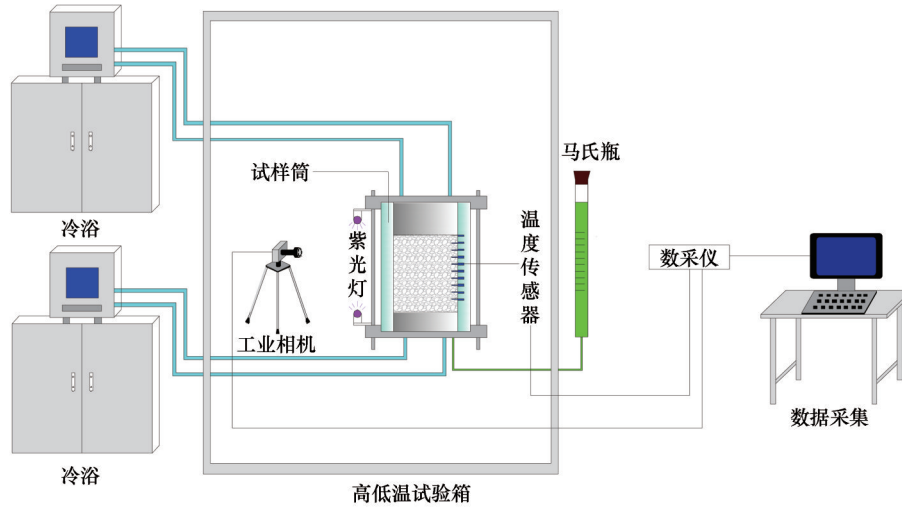


图2 土体水分迁移动态追踪试验装置

Fig. 2 Test apparatus of soil water migration dynamic tracking

图像采集系统主要由光源和定时拍照装置构成,光源方面,采用紫光灯让荧光素显影清晰,并采用高分辨率工业相机以固定时间间隔进行采集,可实时追踪试样中荧光素示踪剂的位置。外界水分补给系统主要由马氏补水瓶(马氏瓶)完成。马氏瓶中荧光素和蒸馏水的质量配比为1:200。Zhang等<sup>[21-23]</sup>在荧光素溶液蒸发冷凝试验中发现荧光素仅能随液态水迁移,无法随着气态水迁移,并且基本不影响土体冻结温度<sup>[32]</sup>。因此马氏瓶中掺加荧光素可用来追踪外界液态水迁移位置的变化。由于土样水分含有荧光素,可以使未冻区呈现明亮的黄绿色以及在冻结区呈现深褐色<sup>[33]</sup>,因此可利用荧光素追踪已有荧光素试样的冻结锋面变化<sup>[32]</sup>。传感器及数据采集系统主要包括温度传感器及数据采集仪。温度传感器为型号SKLFSE-TC的热敏电阻传感器,测量范围为-30~+30℃,精度为±0.05℃。温度传感器与数据采集仪连接,可实时输出试样在不同高度处的温度变化情况。

### 1.2.2 CT试验装置

本试验CT微观机理检测采用中国科学院冻土工程国家重点实验室的CT扫描试验机,该试验机为荷兰飞利浦Brilliance16多能量螺旋机,空间分辨率0.208 mm,密度分辨率0.3%,如图2(b)所示。所有试样均在同等条件下分别进行两次CT扫描:制备好的试样进行初始扫描;在冻融循环试验结束后,快速固定与密封的试样进行二次扫描,CT定位如图2(c)所示。试样的扫描厚度为3 mm,扫描电压120 kV,扫描电流313 mA,滤波函数EC,扫描视野180 mm,重建矩阵1 024×1 024像素,扫描前后采

用标记定位方法<sup>[34]</sup>。

粗颗粒填料是带有初始损伤的无机材料,其内部孔隙被空气和水填充。本文采用岩石材料的统计模型建立其损伤变量。由CT识别的原理可知, $H$ 值(量测状态下的土样CT值)和物质密度之间呈近似正比的关系。 $H$ 值的分布规律本质上反应了岩石密度的分布规律。

根据岩石损伤密度 $\rho$ 与 $H$ 值间的定量关系以及杨更社等提出的密度损伤变量公式<sup>[35-36]</sup>,损伤增量 $D$ 可以描述为<sup>[35-36]</sup>:

$$D = \left( \frac{H_r - H}{1000 + H_r} \right) \frac{1}{m_0^2} \quad (1)$$

式中: $m_0$ 为CT机的空间分辨率; $H_r$ 为岩石基本材料的CT值。

若以有效面积定义损伤,则有:

$$D = 1 - \frac{A_s}{A_0} \quad (2)$$

式中: $A_s$ 为试样的有效面积; $A_0$ 为试验截面面积。

根据孔隙率的定义

$$n = \frac{A_n}{A_0} = 1 - \frac{A_s}{A_0} \quad (3)$$

式中: $A_n$ 为试样孔隙面积。将式(3)带入式(2),得出:

$$D = n \quad (4)$$

联立式(4)和(1)得出以CT值为变量的孔隙率表达式:

$$n = \left( \frac{H_r - H}{1000 + H_r} \right) \frac{1}{m_0^2} \quad (5)$$

考虑到直观的CT图像分析无法准确对CT图像包含的细观物理信息进行定量评价,本文采用CT



值和损伤增量表示材料孔隙特征和孔隙率的变化。CT值与密度值成正比关系,CT值增大表明土体密度增大。损伤增量是表征孔隙率变化的物理量。采用初始损伤状态代替无损状态确定损伤变化,损伤增量为负表明土体孔隙率减小,损伤增量为正表明土体孔隙率增大。

### 1.3 试验方案设计

开放补水条件下,分别配置初始含水率为0%、3%和6%的试样,分别记为w0s0、w3s0和w6s0,w后面数字表示该试样的初始含水率数值,s0表示此组试验均没有施加外部荷载。考虑到已有试验研究表明粗颗粒填料经历5~7次冻融循环后<sup>[37-38]</sup>,力学性能基本稳定,在此取冻融循环周期次数为7次。试验步骤如下:

(1)将称量好的干土样按设计的含水率加入纯水拌和均匀,分三层于试样筒内击实。

(2)土样制作完成之后,在土样表面放置滤纸,并在滤纸上安置透水石来进行土样固定,然后用胶带将三者固定好后进行CT扫描。

(3)采用保鲜膜进行试样密封,密封好后于干燥低温环境静置24 h。在马氏瓶内部加入适量的荧光素溶液,配比为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(4)拆除试样筒内部的上下透水石,将试样安装于上下冷浴盘之间,使其与试样表面充分接触。为防止热量损失,安装保温棉,严密包裹试样筒,并于拍照处开观测窗,用于荧光素迁移的追踪。

(5)调节高低温试验箱温度,并设置上下冷浴盘温度均为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,开始8 h的恒温过程,始终保持箱内和下冷浴盘温度始终保持不变。而后调节上冷浴盘温度开始冻结,单向冻结温度设为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结时间为16 h,融化温度设为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,融化时间为8 h,经历7个冻融循环周期。

(6)水分迁移追踪试验结束后,立即拆样,进行CT扫描,而后分层测定质量含水率。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 温度及冻结深度变化

以w3s0试样为例,不同深度处温度时程变化如图3所示。在冻融循环的作用下,试样不同深度处温度随时间变化具有相同的周期性规律,沿试样高度方向温度呈阶梯性变化。同时,可以发现随着冻融循环次数的增加,试样整体温度呈下降趋势。图4为三个试样在冻融循环作用下最大冻结深度的变

化。由图4可知,土样温度变化与初始含水率相关,初始含水率越大,随着冻融循环次数增加,冻深变化越稳定。

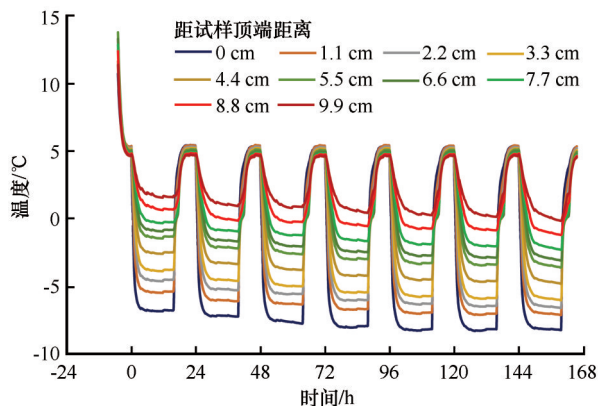


图3 w3s0试样不同深度处温度时程变化

Fig. 3 Temperature time-histories variation of w3s0 at different depths

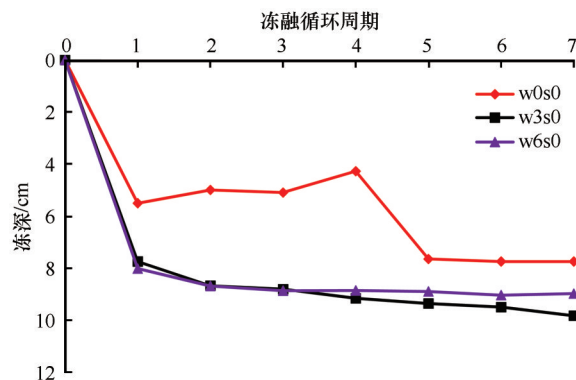


图4 不同初始含水率试样冻融循环条件下冻结深度的变化

Fig. 4 Frost penetration variations of samples with different initial water content under freezing and thawing

### 2.2 外界补水量变化

通过图5中不同初始含水率试样补水量时程变化曲线可知,在冻融循环作用下,w0s0试样补水量

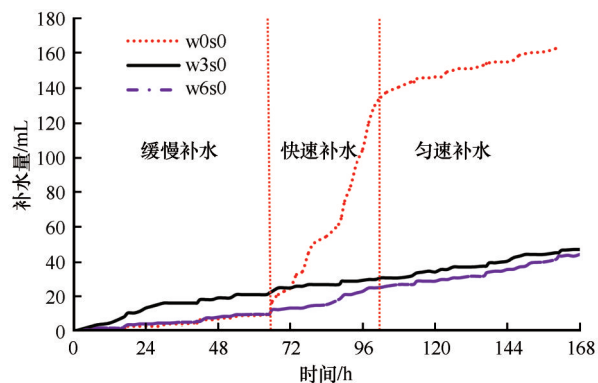


图5 不同初始含水率的试样补水量时程变化

Fig. 5 Water intake time-history variation of samples with different initial water content

随时间变化依次可分为缓慢补水、快速补水、匀速补水三个阶段。试验初期, w0s0 试样补水速率较小, 补水量增加较小, 试样从无水状态转变为有水状态, 发生了质的变化; 随后, w0s0 试样补水速率快速增加, 补水量增加显著, 产生了明显的量变; 最后, 随着试样补水量的进一步增加, 补水变得缓慢, 当试样补水量达到 140 mL 后, 补水速率开始降低为  $1\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ , 直至冻融结束。

w0s0 第 1~3 次冻融循环期间的补水量很小, 第

4~5 次冻融循环期间补水量激增, 之后补水速率逐渐变缓。w3s0 和 w6s0 试样随冻融次数的增加具有相同的补水趋势, 补水速率相差不大且均为匀速补水。两者最终补水量分别为 47 mL 和 43 mL。三组不同初始含水率的试样到试验结束均未停止补水。

2.3 液态水迁移图像

荧光剂示踪技术通过视觉图像捕捉液态水迁移的动态过程。图 6 为 w0s0 试样的荧光剂追踪液态水迁移图像, 横坐标括号中数字及字母表示冻融

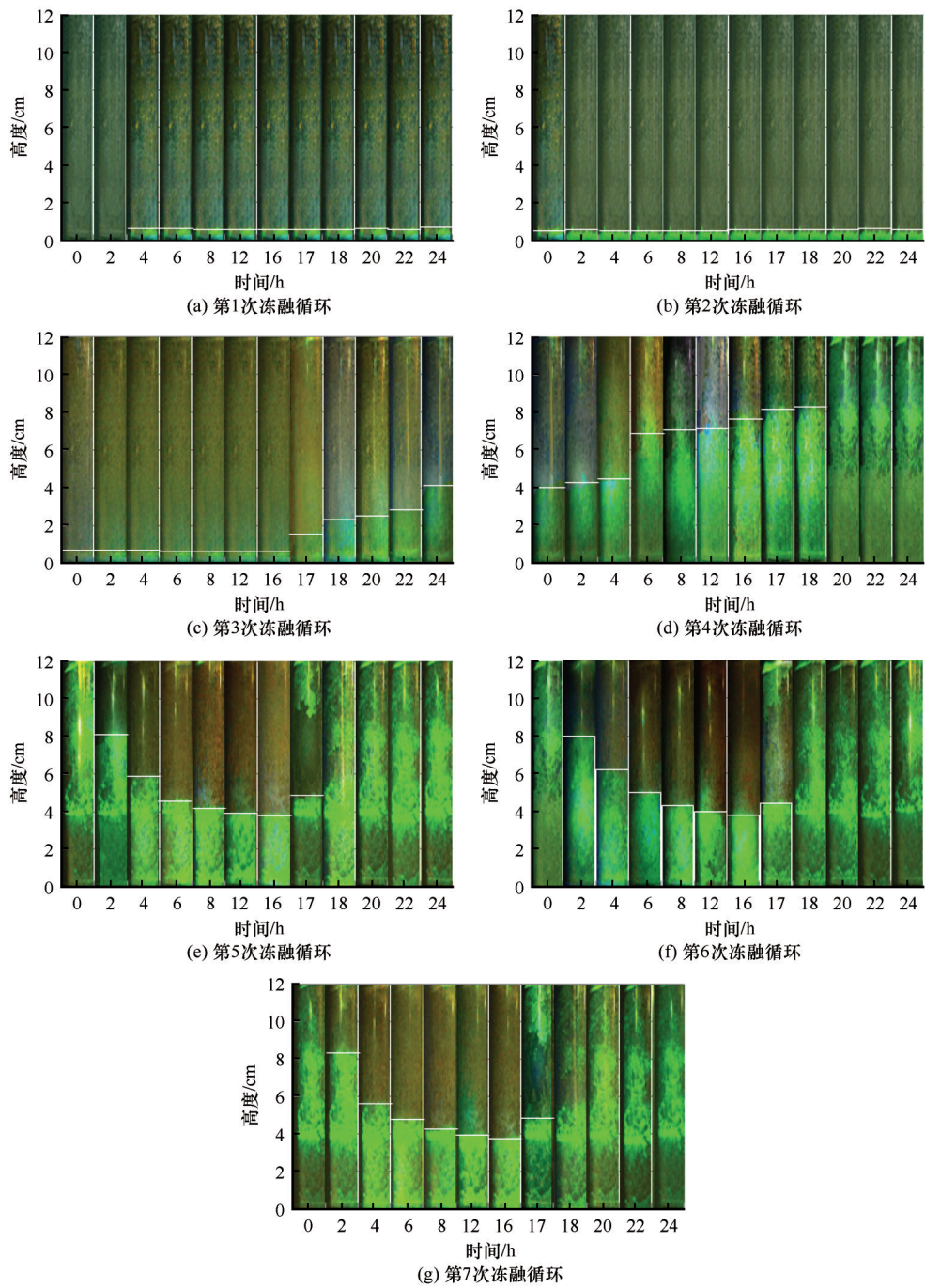


图 6 w0s0 液态水迁移追踪图像

Fig. 6 Liquid water migration tracking images of w0s0: the 1~7 [(a)~(g)] cycle of freezing and thawing

循环次数。图7分别为各试样液态水迁移高度的时程变化及随冻融次数的变化。对比图5可知,对于w0s0,第3个和第4个冻融循环补水量增加较快时,液态水迁移高度快速上升。同时可以看出,第5个循环后,当含有荧光素的液态水上升到冻深范围以内,冻结时随着冻深发展,冻结区域显示为深褐色;融化时,双向融化使得冻结土层上下含荧光素液态水同时向冻结土层移动。从图6可得,对于初始含水率为0%的试样,液态水迁移可以达到试样顶端,对于初始含水率为3%和6%的试样,液态水迁移高度可达到8 cm左右。三个试样基本上在4个冻融循环后稳定。

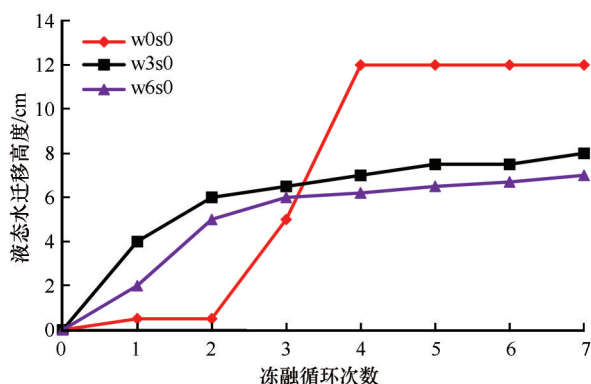


图7 不同初始含水率试样液态水迁移高度随冻融循环次数的变化

Fig. 7 Liquid water migration height variations of samples with different initial water content during freezing-thawing cycles

## 2.4 最终含水率分布

试验结束后,将试样进行CT扫描,而后立即拆解测定其不同位置的含水率,试样最终含水率分布如图8所示,可以发现,w0s0和w3s0试样最终含水率沿深度方向呈“之”字形分布,试验后试样整体含

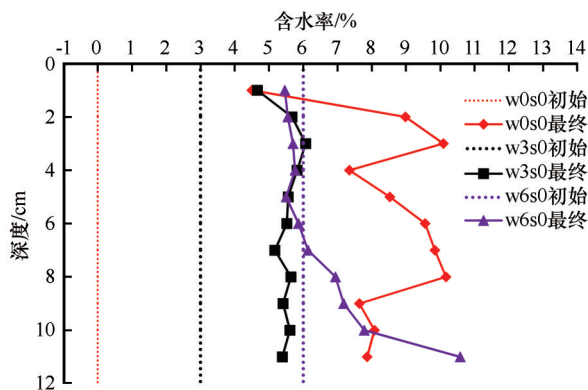


图8 试样最终含水率分布

Fig. 8 The final water content distribution of samples

水率均明显增加。由于w0s0试样最终补水量最大,所以不同深度处最终含水率基本最大;w3s0水分分布较为均匀;w6s0试样最终补水量较小,试样深度6 cm以上土体的含水率较初始含水率略减小,深度6 cm以下的土体含水率较初始含水率均有所增加。

## 2.5 基于CT值表征的土样密度及孔隙率的变化规律

对试验前后试样进行CT扫描,扫描结果如图9所示,借助相关软件对其进一步处理,可得到试样不同位置的CT值,如图10所示。由于粗颗粒填料自身的性质,在制样过程中很难保证每层密度的均匀性,导致CT值曲线沿试样深度方向有所波动。通过对试验前后试样的CT值进行分析,得出w0s0试样在深度2 cm以内CT值减小,而在深度大于2 cm处CT值显著增大。结合图9中的试样CT扫描结果,相比试验前,w0s0试样试验后在深度8.4 cm和10.2 cm截面上,持水细粒发生团聚作用<sup>[16]</sup>(颜色偏黄部分),使得细粒分布更为明显,填料出现一定程度的挤密,颗粒之间的孔隙(蓝色部分)变小。由于未施加荷载,不考虑引起土颗粒的破碎,推测截面上颗粒面积及明暗的变化是颗粒出现了错动和转动<sup>[39]</sup>。根据试样CT值随密度值增大而增大的关系,可以发现在冻融循环的作用下,w0s0试样在深度2 cm以内密度值有所减小,在深度大于2 cm处密度值有所增大,试样密度沿深度方向呈先减小后增大趋势;w3s0试样在深度0.6 cm以下密度值均有所增大,试样密度沿深度方向呈先减小后增大趋势;w6s0试样在深度4 cm以内和深度9 cm以下密度值有所减小,在深度4~9 cm之间密度值有所增大,试样密度沿深度方向呈先减小再增加后减小趋势。

通过对不同初始含水率的试样冻融前后CT值进行增量计算,进一步得出试验后不同含水率试样的损伤增量如图11所示。可以看出,w0s0试样在深度2 cm以内损伤增量大于零,表明在冻融循环作用下试样顶部2 cm范围内发生了微弱的冻胀变形,导致试样顶部的孔隙率有所增大;w0s0试样在深度大于2 cm处损伤增量均小于零,土体主要表现出压密的状态,孔隙率有所减小。对于w3s0试样,冻融循环后试样的损伤增量均小于零,试样整体表现出压密的状态。结合液态水迁移图像及测得的分层含水率可知,试样上部由于水分迁移及孔隙冰的形成,孔隙率增大。试样w6s0初始压密性最好,孔隙



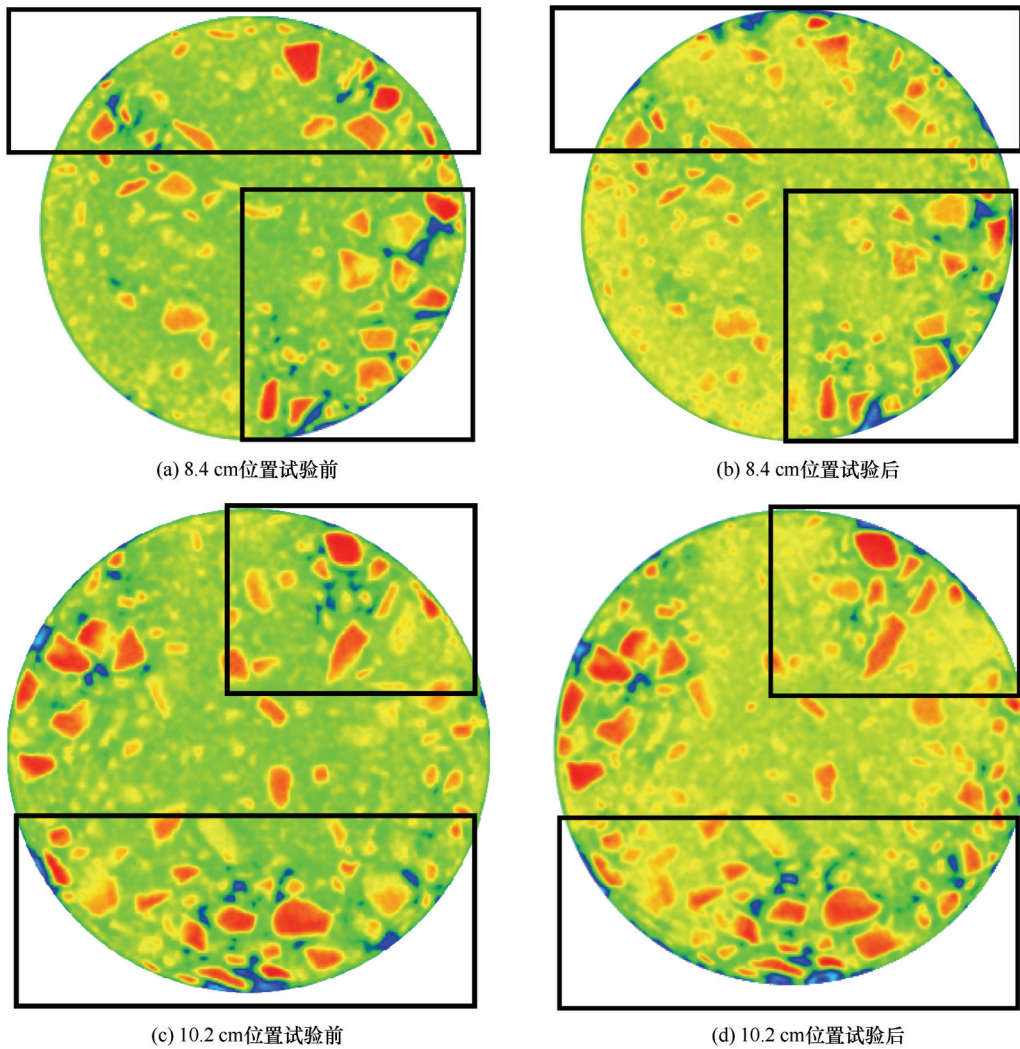


图9 试样w0s0深度8.4和10.2 cm处CT扫描

Fig. 9 CT scanning of sample w0s0 at depth 8.4 and 10.2 cm: before test at depth 8.4 cm (a); after test at depth 8.4 cm (b); before test at depth 10.2 cm (c); after test at depth 10.2 cm (d)

率增大范围及幅值最小。深度9 cm以下试样含水率比较大,孔隙率减小,密度有所减小。w6s0经历冻融循环之后损伤量最小。

### 3 讨论

在干密度一定情况下,土体含水率越大,冻结时释放热量越大,延缓冻结锋面推进进程。但含水量越大,导热越快,将加速冻结锋面推进进程<sup>[40]</sup>。如图4所示,w0s0前面3次冻融循环最大冻深较小,第4次冻融循环时冻结深度减小,考虑是由于在第4个冻融周期时出现了一个较为明显的补水量。从图5~6可以看到,第4次冻融循环期间液态水出现了较为明显的迁移。试样含水量的增加,在这个冻融循环期间表现为阻碍了冻结锋面的推进,第5~7个冻融循环期间,表现为促进了冻结锋面的向下推

进。初始含水率越大,补水量越小。相对应地,不同冻融循环作用下冻深的变化越稳定。由此可见,冻深发展和水分尤其是液态水迁移是一种相互作用的关系。

通过对不同初始含水率试样补水量的时程变化曲线分析可得,w0s0试样在前3次的冻融循环下补水速率缓慢,补水量较小,此时的温度梯度并不会引起明显的水分迁移。这一现象可能是由于含水率为0%的填料在制样过程中,其细颗粒在重力和击实功的作用下顺着颗粒间孔隙下落,导致试样底部细颗粒含量明显增加,所以试验前期的补水主要是由细颗粒毛细作用引起的。试样在3次冻融循环后,随着试样内部水分的迁移和冻融作用下内部颗粒的结构形态基本形成,孔隙结构变化引起使得水分迁移通道连通,第4~5次冻融循环期间补水量

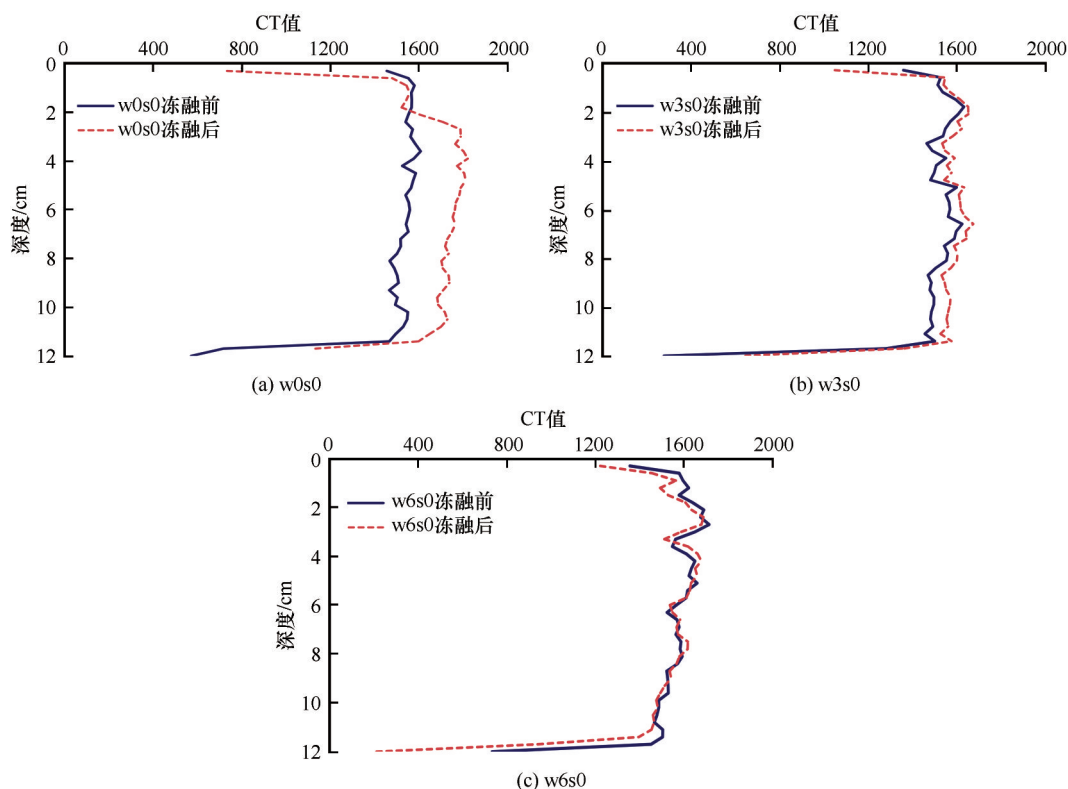


图 10 不同初始含水率试样冻融前后 CT 值变化

Fig. 10 CT value variations of samples with initial water content before and after test

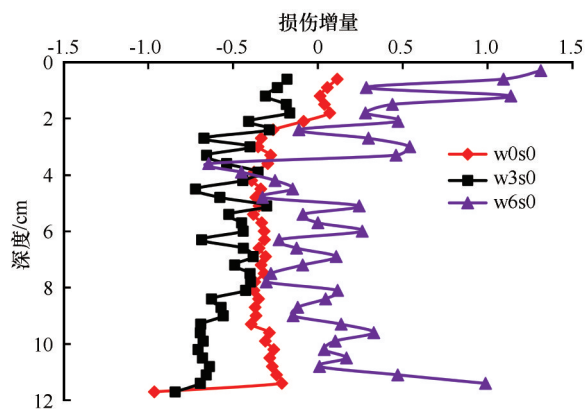


图 11 不同初始含水率试样冻融后损伤增量

Fig. 11 Damage increment of samples with different initial water content after freezing-thawing test

激增,尤其是液态水快速向上迁移到达试样顶部,使得试样整体含水率均有所增加,随后试样补水速率逐渐变得缓慢。而对于 w3s0 和 w6s0 而言,第 1 次的冻融循环,外界水分的补给迁移使土体内部形成了良好的孔隙结构,有利于土体内部的水分迁移,但在第一次冻融循环后,试样内部的部分孔隙被持水性较好的细颗粒簇团填充,造成水分迁移通道的堵塞,使得后期试样的补水受到抑制,后续水分补给增长缓慢,液态水迁移高度也增长缓慢。

对比既有单次冻结作用下不同初始含水率试样水汽迁移特征的变化可知<sup>[21-22]</sup>,初始含水率影响外界水分迁移量,包括液态水和气态水的迁移量,且均呈现出初始含水率越大,补水量越小,液态水迁移高度越低的特点。本文中试验采用的是快速冻结、快速融化的温度控制方式,类似于季节冻土区春融期初始时的外界温度变化情况。结合 CT 值及损伤增量的分析可知,由于双向融化导致此时的活动层下方富集水分无法排除。反复冻融作用下,下方液态水持续上升可能导致春融期间冻胀变形出现暂时增长,而后随着水分的不断补给,尤其在外界水的不断补给作用下,颗粒间的位置错动占据了原来的孔隙空间,部分孔隙逐渐被外界水填充,使得颗粒之间的润滑度有所增大,更多细粒簇团形成,孔隙率减小,密实度增加。在冻融循环作用下,孔隙水压力变化均呈现周期性的变化过程,尤其是融化期孔隙水压力快速增大<sup>[41]</sup>,土体密实度得到提高,宏观表现主要是融沉变形发生,变化趋势与已有监测数据吻合<sup>[24]</sup>。

#### 4 结论

通过研究冻融循环作用下不同初始含水率的



粗粒土水分迁移规律及土体密度和孔隙率细观演化特征,得出以下结论:

(1)不同初始含水率的试样随冻融循环的次数增加,基本上冻深呈不断加深的变化趋势。 $w_{0s0}$ 冻结深度最小, $w_{3s0}$ 和 $w_{6s0}$ 在经历7次冻融循环过程中的冻深发展趋势相似。不同冻融循环作用下, $w_{6s0}$ 冻深变化相对最稳定。

(2)不同初始含水率的试样在短期反复冻融循环的作用下补水量不断增加,试样初始含水率对其外界水分补给量存在一定的影响,外界补水量以及液态水迁移高度与试样初始含水率均呈负相关。

(3)试样在经历多次冻融循环后, $w_{0s0}$ 和 $w_{3s0}$ 试样密度整体增大, $w_{6s0}$ 试样部分位置密度增大,各试样孔隙率以减小为主。初始压密性最好的 $w_{6s0}$ 上部孔隙率增大范围及幅度最大,下部孔隙率减小幅度最小,试验后密度变化最小。冻融循环作用引起的水分补充和迁移导致土体颗粒发生错动转动,持水细粒的团聚作用更为明显,颗粒构造和孔隙结构的变化进而改变了土体的孔隙率和密度,使得土体发生变形。

## 参考文献(References):

- [1] Xu Jian, Niu Fujun, Li Aimin, et al. Analysis of the prevention effect of thermal-insulation method on frost heave of railway subgrade in seasonal frozen regions[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(6): 124-131. [许健, 牛富俊, 李爱敏, 等. 季节冻土区保温法抑制铁路路基冻胀效果研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(6): 124-131.]
- [2] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen region[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 1-7. [许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1-7.]
- [3] Ye Yangsheng, Wang Zhongjin, Cheng Aijun, et al. Frost heave classification of railway subgrade filling material and the design of anti-freezing layer[J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 1-7. [叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 1-7.]
- [4] Wang Tianliang, Yue Zurun. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359-365. [王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗颗粒填料冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359-365.]
- [5] Liu Hua, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Study of design of filling material and setting anti-frost layer for high-speed railway roadbed in seasonally frozen regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2549-2557. [刘华, 牛富俊, 牛永红, 等. 季节性冻土区高速铁路路基填料及防冻层设置研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2549-2557.]
- [6] Shi Gangqiang, Wang Xun. Frost heaving test of roadbed filling of Harbin-Dalian passenger dedicated line[J]. Railway Engineering, 2011, (10): 61-63. [石刚强, 王珣. 哈大铁路客运专线路基填料冻胀性试验研究[J]. 铁道建筑, 2011, (10): 61-63.]
- [7] Niu F J, Li A Y, Luo J, 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.
- [8] Niu F J, Zheng H, Li A Y. The study of frost heave mechanism of high-speed railway foundation by field-monitored data and indoor verification experiment[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15: 581-593.
- [9] Cai Degou. Test on frost heaving spatial-temporal distribution of high speed railway subgrade in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 16-21. [蔡德钧. 高速铁路季节性冻土路基冻胀时空分布规律试验[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 16-21.]
- [10] Zhang Yuzhi, Du Yanliang and Sun Baochen. Roadbed deformation characteristics of roadbed-bridge transition section for high-speed railway in seasonally frozen soil region[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 39-45. [张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路桥过渡段路基变形特征分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 39-45.]
- [11] 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.]
- [12] Gao Jianqiang, Lai Yuanming, Zhang Mingyi, et al. Experimental study on the water-heat-vapor behavior in a freezing coarse-grained soil[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 956-965.
- [13] Teng J D, Shan F, He Z, et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand[J]. Geotechnique, 2019, 69(3): 251-259.
- [14] He Z, Teng J D, Zhang S, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: an experimental study of two types of canopy effect[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 3(3): 243-249.
- [15] Sheng Daichao, Zhang Sheng, Niu Fujun, et al. A potential new frost heave mechanism in high-speed railway embankments[J]. Geotechnique, 2014, 64(2): 144-154.
- [16] Zhao Guotang, Jiang Jinyang, Cui Yinghui, et al. Distribution on feature of fine-graining filling materials of high-speed railway subgrade and its impact on frost heaving[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 1-9. [赵国堂, 蒋金洋, 崔颖辉, 等. 高速铁路路基填料中细颗粒分布特征及其对冻胀的影响[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 1-9.]
- [17] China State Railway Administration. Code for design of railway earth structure (TB 10001—2016) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. [国家铁路局. 铁路路基设计规范(TB 10001—2016) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.]
- [18] China State Railway Administration. Code for design on special railway earth structure (TB 10001—2016) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018. [国家铁路局. 铁路特殊路基设计规范(TB 10035—2016) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.]
- [19] Wan Hanli, Bian Jianmin, Wu Juanjuan, et al. Prediction of seasonal frost heave behavior in unsaturated soil in northeastern china using interactive factor analysis with split-plot experiments and GRNN[J]. Water, 2019, 11(8): 1587.

- [20] Uthus L, Hermansson Å, Horvli I, et al. A study on the influence of water and fines on the deformation properties and frost heave of unbound aggregates[M]//Current Practices in Cold Regions Engineering. 2006: 1-13.
- [21] Zhang Y Z, Ma W, Wang T L, et al. Characteristics of the liquid and vapor migration of coarse-grained soil in an open-system under constant-temperature freezing[J]. Cold Regions Science and Technology 2019, 165, 102793.
- [22] Wang T L, Zhang Y Z, Ma W, et al. Investigation of liquid and vapor migration in coarse-grained soil during open-system step-freezing test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165, 102816.
- [23] Zhang Y Z, Zhao W G, Ma W, et al. Effect of different freezing modes on the water-heat-vapor behavior in unsaturated coarse-grained filling exposed to freezing and thawing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 174: 103038.
- [24] Miao Q, Niu F J, Lin Z J, et al. Comparing frost heave characteristics in cut and embankment sections along a high-speed railway in seasonally frozen ground of Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 170: 102921.
- [25] Mu Yanhu, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919-1925. [穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925.]
- [26] Qi Jilin, Ma Wei. Influence of freezing-thawing on strength of over consolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082-2086. [齐吉林, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2082-2086.]
- [27] Zhang Ze, Ma Wei, Qi Jilin. Structure evolution and mechanics of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1904-1914. [张泽, 马巍, 齐吉林. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1904-1914.]
- [28] Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 132-137. [郑邴, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 132-137.]
- [29] Chen Shijie, Zhao Shuping, Xing Lili, et al. Effect of CT scanning parameters to the quality of rock and soil tomograms[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(2): 245-254. [陈世杰, 赵淑萍, 邢莉莉, 等. CT扫描参数对岩土图像的影响[J]. CT理论与应用研究, 2013, 22(2): 245-254.]
- [30] Chen Shijie, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: present studies and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 193-200. [陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193-200.]
- [31] Wang Yongtao, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Laboratory observation and analysis of frost heave progression in clay from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131, 381-389.
- [32] Zhang Yuzhi, Ma Wei, Zhao Weigang, et al. Water-heat-vapor migration trace and characteristics of unsaturated coarse-grained filling under freeze and thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 156-165. [张玉芝, 马巍, 赵维刚, 等. 冻融循环作用下非饱和粗颗粒填料水热汽迁移追踪及规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 156-165.]
- [33] 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.
- [34] Wang Haiyong. Macroscopic and mesoscopic experimental study on the mechanism of water migration of coarse grained soil under freezing-thawing cycle and load[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. [王海永. 冻融循环和荷载作用下粗颗粒土水分迁移机制宏观微观试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.]
- [35] Yang Gengshe, Xie Dingyi, Zhang Changqing, et al. The quantitative analysis of distribution regulation of CT value of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279-285. [杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤CT数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-285.]
- [36] Yang Gengshe, Liu Hui. Study on microstructure and damage mechanical characteristics of frozen rock based on CT image processing[M]. Beijing: Science Publishing House, 2016. [杨更社, 刘慧. 基于CT图像处理的冻结岩石微观结构及损伤力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [37] Wang Jing, Liu Hanbing, Wu Chunli, et al. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 633-639. [王静, 刘寒冰, 吴春利, 等. 冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 633-639.]
- [38] Bu Jianqing, Wang Tianliang. Influences of freeze-thaw and fines content on mechanical properties of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 608-614. [卜建清, 王天亮. 冻融及细粒含量对粗颗粒填料力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 608-614.]
- [39] Zuo Yongzhen, Cheng Zhanlin, Ding Hongshun. Application of CT technology in the structural fabric of coarse grained soil[J]. Yellow River, 2010, 32(7): 109-111. [左永振, 程展林, 丁红顺. CT技术在粗粒土组构研究中的应用[J]. 人民黄河, 2010, 32(7): 109-111.]
- [40] Wang Tiehang, Wang Juanjuan, Zhang Longdang. Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural science edition), 2012, 44(1): 7-13. [王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(1): 7-13.]
- [41] Huang Yongting, Ma Wei, He Pengfei, et al. Laboratory tests on pore water pressures in soils subjected to cyclic freeze-thaw under different loads[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021[2021-03-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20210316.1618.002.html>. [黄永庭, 马巍, 何鹏飞, 等. 有压冻融土体孔隙水压力变化试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021[2021-03-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20210316.1618.002.html>.]

## Macro-micro experimental investigation of the initial water content influence on water migration of coarse-grained soil subjected to freezing and thawing

ZHANG Yuzhi<sup>1,2,3</sup>, LIU Wenlong<sup>4</sup>, WANG Haiyong<sup>4,5</sup>, ZHANG Lianhai<sup>6</sup>,  
CHEN Shijie<sup>6</sup>, ZHU Xiaodong<sup>4</sup>

(1. Structure Health Monitoring and Control Key Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Collaborative Innovation Center for Performance and Safety of Large-scale Infrastructure, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 5. Survey and Design Institute Branch, China Railway 19 Bureau Group Co., LTD, Beijing 102600, China; 6. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Freezing-thawing and initial water content are the main factors to influence the water migration characteristics, frost heaving and thaw settlement of coarse-grained soil. To clarify the water migration characteristics and micro mechanics of coarse-grained soil with different initial water content under freezing and thawing, fluorescein is taken as the tracer and computerized tomography (CT) is adopted as the micro mechanics method, a series of experiments were carried out to study the temperature field, frost depth development, water supply, final water distribution, water migration images and CT values of the coarse-grained soils with different initial water content under freezing and thawing. Results indicate that the frost depth increase continually with the increasing numbers of the freezing-thawing cycles basically. The external water supply and the migration height of the liquid water are negatively correlated with the initial water content. CT scanning results indicate that after several times of freezing-thawing, the water migration results in the changes of the soil pore and particle structure, then the changes of the samples density increase and the porosity decreases, then the related deformation occurs in the soil.

**Key words:** coarse-grained soil; CT value; freezing-thawing cycles; initial water content; water migration

(责任编辑: 李国玉)