

# 冻融条件下路基温度场和湿度场分布式感知试验

凌建明<sup>1</sup>, 张 玉<sup>1</sup>, 钱劲松<sup>1</sup>, 吴振吉<sup>2</sup>, 郑纯宇<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 民航机场建设集团 西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610000;

3. 吉林省交通科学研究所 吉林 长春 130012)

**摘要:** 搭建土体冻融多物理场感知室内试验装置, 布设传统点式传感器和分布式光纤, 对土体冻融过程中路基温度场、湿度场和变形情况开展试验监测, 探究单端冻结、双端融化条件下土体温度场和湿度场的分布式感知特征, 验证主动加热分布式光纤技术的监测效果。试验结果表明,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  单端冻结条件下, 土体冻结过程按降温速率分为快速冷却、逐步降温、稳定平衡三阶段, 冻结锋面逐渐下移, 最大冻深约占土柱高度的 35%。孔隙水受冻胀迁移力影响向冻结锋面移动, 引起冻融前后土体湿度场重分布, 并导致土体冻胀变形, 变形量为土体最大冻深的 7.8%~10.9%。分布式光纤可准确得到冻融过程中土体温度场、湿度场变化特征, 识别土体内冻结区域范围, 温度、湿度监测拟合优度  $R^2$  分别达 0.98 和 0.94。

**关键词:** 路基工程; 温度场; 湿度场; 分布式感知; 季冻区路基; 主动加热光纤

中图分类号: U416.1+6

文献标志码: A

## Laboratory Study on Temperature Field and Moisture Field Distributed Sensing of Subgrade in Freezing and Thawing

LING Jianming<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, QIAN Jinsong<sup>1</sup>,  
WU Zhenji<sup>2</sup>, ZHENG Chunyu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Southwest Design and Research Institute Co., Ltd., CACC, Chengdu 610000, China; 3. Jilin Provincial Transport Scientific Research Institute, Changchun 130012, China)

**Abstract:** In this paper, a laboratory test device for multi-physical field sensing during soil freezing and thawing was established. Traditional point sensors and distributed optical fibers were used in the test to monitor the temperature field, moisture field, and deformation

of the subgrade during freezing and thawing process. Distributed sensing characteristics of the temperature and moisture fields of the soil under single-ended freezing and double-ended thawing condition were investigated, and the monitoring performance of the active heating distributed optical fiber technology was verified. The results show that, under the condition of  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  single-ended freezing, the soil freezing process is divided into three stages according to the cooling rate, i. e., the rapid cooling stage, the gradual cooling stage, and the stable equilibrium stage. The freezing front gradually moves down during freezing, and the maximum freezing depth is about 35% of the height of soil column. The pore water is affected by the frost heave migration force to the freezing front and causes the redistribution of soil moisture field before and after freezing and thawing, thus causes frost heave deformation of the soil, which accounts for 7.8 % to 10.9 % of the maximum freezing depth of soil column. The distributed optical fiber can accurately obtain the characteristics of the soil temperature and moisture fields during the freezing and thawing process, and identify the range of the freezing area in the soil. The goodness of fit  $R^2$  of temperature and moisture monitoring reaches 0.98 and 0.94, respectively.

**Keywords:** subgrade engineering; temperature field; moisture field; distributed sensing; subgrade in seasonal frozen area; active heated fiber optics

季节性冻土广泛分布在我国北方地区, 土中水分冬季冻结、春季融化, 产生由温度、湿度的季节性变化和水分相变引起的变形<sup>[1]</sup>。季冻土地地区路基在冻融循环过程影响下, 将产生不均匀变形和模量衰减, 引发路面平整度劣化、边坡冻融塌陷、路面纵横

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600200); 吉林省交通运输科技项目(2018-1-6)

第一作者: 凌建明, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: jmling@tongji.edu.cn

通信作者: 钱劲松, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: qianjs@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

向开裂等道路病害,导致养护成本增加,通行效率降低<sup>[2-3]</sup>。

季冻区路基的冻融程度受到土体类型、温度场、湿度场等影响,各物理场呈现时空梯度变化,在冻融过程中具有明显的水热力耦合特性<sup>[3]</sup>。一方面,温度场改变导致土体中水分相变,受热力学、力学和物理化学等综合作用,未冻土中的水分将向冻结锋面迁移运动;另一方面,水分迁移和相变引起土体传热性质的改变,进一步改变土体的温度场<sup>[4-5]</sup>。掌握路基冻融过程中温度、湿度和变形场的变化状况,对提高季冻区路基的稳定性与使用寿命具有重要意义。

对于冻融条件下土体温度、湿度、变形等物理场监测,现有技术多以人工监测和点式监测为主。人工监测耗时耗力,难以全域监测;点式监测依托温度计、湿度计等点式传感器,可得到准确的监测结果,现已广泛应用于实际工程中。然而,受点式传感器的布设密度所限,点式监测方法无法反映路基温度场、湿度场的梯度变化特征,因此需要采用大范围、低成本、抗干扰、分布式的感知手段开展季冻区路基多物理场监测。分布式光纤传感技术是近年来发展起来的一种信息传感技术,具备长距离、全过程、分布式感知的能力<sup>[6]</sup>,与传统点式传感器不同,光纤本身即是传感器又是传输线,具有防水防潮、耐高温、防雷击、抗腐蚀、抗电磁干扰等特点,适用于恶劣环境下较大范围内监测变量的连续感知<sup>[7]</sup>。

目前,分布式光纤传感技术已广泛应用于测量振动<sup>[8]</sup>、温度<sup>[9-10]</sup>、应变<sup>[11-12]</sup>、位移<sup>[13-14]</sup>等物理量。近年来,有学者提出了基于主动加热分布式光纤(actively heated fiber optics, AHFO)的土体湿度监测技术<sup>[15]</sup>。AHFO监测技术将具有内部加热功能的光纤电缆用作热探头,同时用作热源和温度计。土体作为多孔介质材料,其热导性与土质、温度、孔隙度、含水率等有关,而一般情况下土质、孔隙度等参数保持不变,仅有含水率为可变因素,故可以考虑通过测量外界加热条件下土体的热导性质,测量土体的含水率<sup>[16]</sup>。学者们对砂土、粉土、黏土进行研究,发现可通过建立导热系数-含水率关系或实测温度-含水率关系,求得土体含水率<sup>[17-20]</sup>。2010年,Sayde等<sup>[21]</sup>首次利用对测温光纤的加热实现了砂土含水率的测量,相关度高达0.98。Minardo等<sup>[22]</sup>利用基于布里渊分布式光纤温度应变系统(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA),根据加热后不同含水率条件下凝灰岩温度响应的差异判定土体含水率变化,并初步建立了加热后降温至常温时间的倒数

与凝灰岩样品含水率间的关系;曹鼎峰<sup>[15]</sup>首次利用碳纤维内加热温度感测光缆和分布式光纤湿度解调仪开展试验,此外,研究团队还将直埋碳纤维分布式光纤埋置于户外草坪中<sup>[23-25]</sup>,开展大范围现场监测试验,获得了该区域16个月的湿度场变化图。基于主动加热分布式光纤进行土体湿度监测的AHFO方法具有分布式测量、测试结果稳定的优点,正处于快速发展中。然而,AHFO方法用于季冻区路基冻融过程监测的实际效果尚需进一步研究和验证。

为此,本文基于分布式光纤感知技术,搭建土体冻融多物理场感知室内试验装置,通过布设分布式光纤和传统点式传感器,对土体冻融过程中路基多物理场,即温度场、湿度场、变形场开展试验监测,明确单端冻融条件下土体温度场和湿度场的分布式感知特征,验证主动加热分布式光纤技术的监测效果。

## 1 土体温湿度场分布式感知原理

用于温度监测的分布式光纤采用光纤与封装外壳松套结构,一旦温度发生变化,光纤将产生变形,其布里渊散射信号将发生变化。通过解调仪采集到信号变化后,可反算得到光纤变形情况,进而得到光纤所在位置的温度。用于湿度监测时,则需要借助主动加热光纤技术,通过主动加热光纤本身的温度监测功能得到光纤附近土体温度,再根据土体导热系数与土体含水率之间的正相关关系得到土体含水率<sup>[26-27]</sup>。对于埋置在土中的含加热层的光纤,当对光纤外的加热层施加恒定的加热功率时,加热层热量将分别向土体和光纤传导,如图1所示。然而,由于不同含水率的土体导热系数和比热容不同,加热层向土体和光纤传递的热量将产生差异,进而导致光纤受热后产生不同的温度响应。利用分布式光纤解调仪感知光纤的温度响应差异后,即可根据预先建立的温度响应指标与土体含水率的关系反演土体湿度场<sup>[25,28]</sup>。

当埋设在土体中的光纤受热时,光纤上某一点的温度响应如图2所示。可见,光纤温度依次经历快速上升阶段和稳定阶段。在快速上升阶段,光纤温度-时间曲线呈现明显弯曲,温度上升速率随时间缓慢下降;而在稳定阶段,光纤温度随时间的增长接近线性变化。图2中, $t_0$ 为稳定阶段的起始时间,根据温升曲线图形中曲线段和近似直线段的交界点选取<sup>[23,29]</sup>;  $t_1$ 为停止加热的时间。两个阶段划分的具体时间及对应的温度范围与热源参数、待测土体性质、

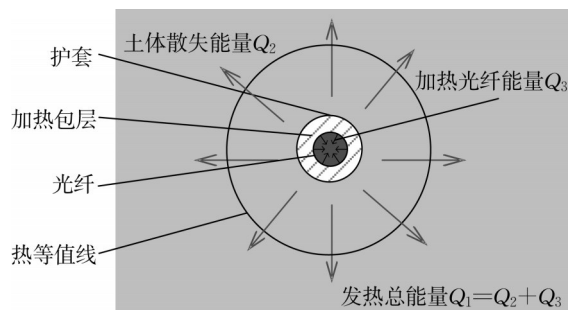


图1 分布式光纤加热过程中的能量分布

Fig. 1 Energy distribution in distributed optical fiber during heating process

光纤布设方式等因素均存在关联,宜根据实际试验结果进行确定。在AHFO测试中,有必要建立温度响应表征指标,以预估得到土体含水率。目前,常用的温度响应表征指标包括累积升温值、土体热导率、温度特征值等<sup>[23]</sup>。其中,温度特征值具有计算简便,可避免快速上升段随机性影响的优点,适于本研究中大量感知数据的处理<sup>[21,27]</sup>。温度特征值定义为光纤加热后温度上升到稳定阶段后某一段时间内的温度上升平均值,可按式(1)计算。

$$T_t = \frac{\sum_{t_a}^{t_b} \Delta T_i}{n} \quad (1)$$

式中: $T_t$ 为温度特征值; $\Delta T_i$ 为光纤第*i*个时刻的温升值; $n$ 为稳定阶段内测量次数。

温度特征值与体积含水率之间的关系可由式(2)表示。

$$\theta_w = kT_t + b \quad (2)$$

式中: $\theta_w$ 为体积含水率; $k$ 和 $b$ 为常数项,可由试验数据拟合得到。由此,只要测得温度特征值 $T_t$ ,即可求得对应的体积含水率。

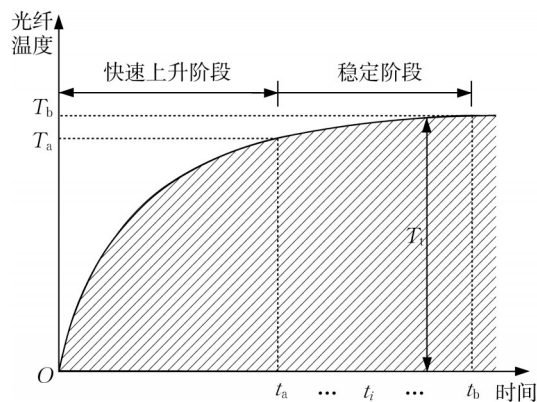


图2 土中光纤受热后温升曲线

Fig. 2 Temperature rise curve of fiber in soil after heating

## 2 冻融条件下路基多物理场感知室内试验设计

### 2.1 土体冻融多物理场感知试验装置

土体冻融多物理场感知试验装置如图3所示,包括主试验箱、制冷模块、光纤传感模块、点式传感模块、供水模块5个部分,可开展不同工况下的土体冻融试验,并通过分布式光纤等传感设备感知冻融过程中的物理场。

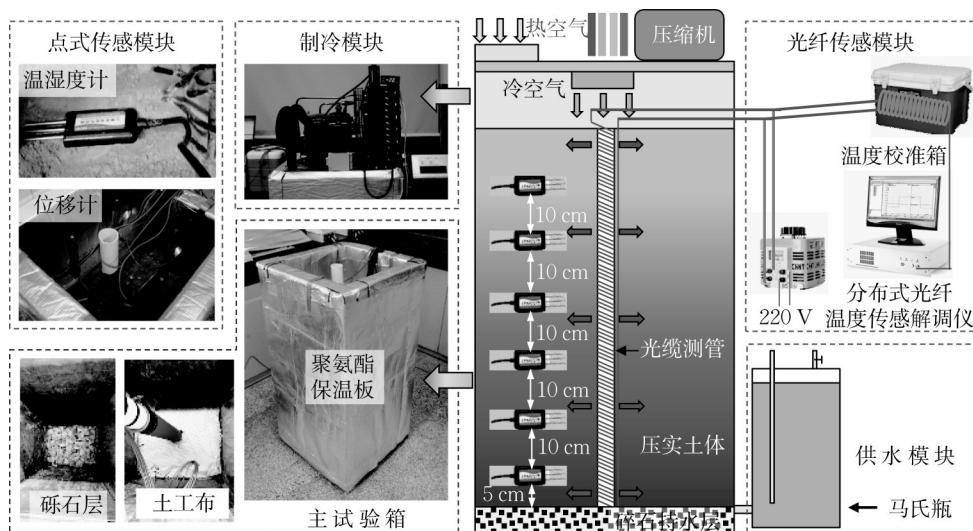


图3 土体冻融多物理场感知试验装置

Fig. 3 Multi-physical field sensing test device for soil freezing and thawing



主试验箱为壁厚2 mm的开口不锈钢矩形箱体,内部尺寸为40 cm×40 cm×100 cm,用于盛装待测压实土体,容纳安装其余测试模块。为实现对待测土体的均匀恒定水位补水,箱体底部填筑了5 cm的碎石用于模拟持水层,持水层一侧箱体设置进水口;持水层上部为钢丝网和土工布,用于隔离待测土体与持水层。这一设置的目的在于模拟实际填方路基中部区域在地下水上升作用影响下的竖向一维水分迁移过程。同时,为提高冻融过程中主试验箱的保温性能,减小环境温度对冻融的影响,箱体外壁安装了厚5 cm的可拆卸聚氨酯保温板,其导热系数为 $0.025\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。制冷模块位于主试验箱顶部,可控制待测土体上表面温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

制冷模块的主要组件包括制冷压缩机、冷凝器、散热器、风扇等,上述组件安装于钢制顶盖板上,便于与主试验箱整体拆装。为提升制冷模块的保温性能,使用与主试验箱一致的聚氨酯保温板进行保温处理。

光纤传感模块用于冻融过程中土体的温度场和湿度场的分布式感知,由光纤测管、分布式光纤温度传感解调仪和加热设备组成。为提高土体湿度场分布式感知技术的空间分辨率,将碳纤维加热光纤均匀紧密缠绕在直径5 cm的PVC管上,如图4所示。经过缠绕后的光纤测管分辨率可由式(3)计算。缠绕后光缆测管的空间分辨率得到显著提高,为2.9 cm,是直埋光纤1 m分辨率的34倍。由于PVC材料的导热系数不到土体的1/20,因此PVC管的温度变化对测试结果影响较小。

$$M=\frac{S}{\pi(D+\phi)}\phi$$

(3)

式中: $M$ 为光缆测管的空间分辨率; $\phi$ 为碳纤维加热光缆外径,取5 mm; $D$ 为PVC管直径,取5 cm; $S$ 为分布式光纤温度传感解调仪的空间分辨率,取1 m。

分布式光纤测试加热功率沿光纤方向为 $2.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ ,换算为沿测管方向为 $74.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ 。单次测试加热时长需考虑温度特征值计算曲线,避免加热时间过长引起土体温度场和湿度场的改变。根据综合预试验温升曲线结果和既有文献<sup>[23]</sup>确定加热时长为1 200 s,取900~1 200 s稳定阶段的温升数据计算温度特征值。

点式传感模块由铂电阻温度传感器、时域反射技术湿度传感器(time domain reflectometry, TDR)组成。其中,温度传感器与湿度传感器均匀布设在各土层内部,距离顶面深度为0.1~0.6 m,间距为

0.1 m。连接传感器可自动、连续地采集各测点的物理参数。传感器主要技术参数如表1所示。

供水模块主体为刻有标尺的5 L马氏瓶,马氏瓶底部通过带阀门的软管与主试验箱底部相连。由伯努利原理可知,马氏瓶可持续进行恒定水头水分补给,使试验箱内水位保持不变。

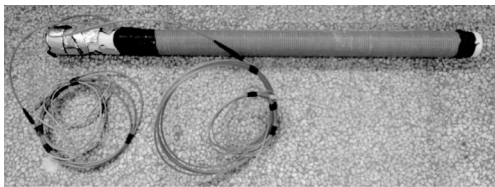


图4 室内试验所用分布式光纤测管

Fig. 4 Distributed optical fiber tube in laboratory test

表1 传感器主要参数

Tab. 1 Main parameters of sensors

传感器	量程	精度	采集频率
铂电阻温度传感器	$-30\sim70\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 2\text{ Hz}$
TDR湿度传感器	$0\sim50\%$	$\pm2\%$	$\leq 2\text{ Hz}$
LVDT位移传感器	$0\sim10\text{ cm}$	$\pm0.01\text{ mm}$	$\leq 10\text{ Hz}$

2.2 材料与试件制备

试验所用土样取自吉林松原,为低液限粉土,级配曲线如图5所示。土体最大干密度为 $1.91\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最佳体积含水率为20%。土的液限和塑限分别为30.7%和20.9%。

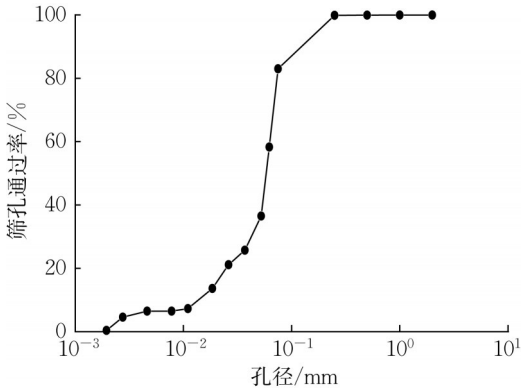


图5 土体级配曲线

Fig. 5 Gradation curve of tested soil

在主试验箱底部填筑5 cm厚的碎石层用于赋存水分,碎石直径大于9.5 mm。在碎石层上放置铁丝网和土工布,并将光纤测管临时固定在主试验箱正中。按照最佳体积含水率烘干、拌合土样,称量已拌合土样并将其分层填入主试验箱内,使用击实锤击实土体,每层击实厚度5 cm,土体设计干密度为

1.65 g·cm<sup>-3</sup>, 压实体积含水率为20%, 对应压实度为85%。当土体填筑至相应高度时, 将铂电阻温度传感器和TDR湿度传感器插入土体, 传感器探针应正对光纤测管, 探针头部与光纤测管间距约为2 cm, 传感器通讯线缆沿主试验箱内侧壁布设。土体填筑至预定高度65 cm后, 安装位移传感器、制冷装置, 静置48 h使水分达到平衡。

### 2.3 试验流程

在试验开始前, 首先通过毛细水上升阶段模拟实际路基土体的地下水位上升作用, 在试件土体内形成湿度梯度<sup>[30]</sup>。通过供水模块, 在室温25℃向土体提供恒定水头补给, 水头高度与土体底部高度一致, 持续72 h。由于这一阶段土柱内湿度变化范围较大, 因此取该阶段数据建立分布式光纤温度特征值与土体体积含水率之间的关系。

土体冻融试验主要分为冻结阶段和融化阶段。冻结阶段, 土柱顶端温度控制为-15℃, 持续134 h。此时, 冷却能量从土体顶部向底部传导, 并在底部地热能限制下形成单端冻结试验条件。在此过程中, 持续观测土体冻结过程中的温度场、湿度场和冻胀变形情况。融化阶段, 关闭制冷模块, 观测土体逐渐融化过程中温度场、湿度场和变形情况。此时, 土体顶部的温度将与室温保持一致, 使已冻土体在室温和地温影响下双向融化。此阶段持续至土柱完全恢复室温。

### 2.4 冻融试验准备

毛细水上升阶段, 由TDR湿度传感器可测得土体中6个埋设位置处的体积含水率, 利用双调和样条插值法可得到土体含水率沿深度方向的连续数据。分布式光纤加热过程中求得的温度特征值与对应体积含水率的关系见图6, 根据图6, 即可在试验过程中计算土体体积含水率。

毛细水上升阶段, 由TDR湿度传感器和分布式光纤测得的土体水分场沿深度分布规律分别如图7和图8所示。可以看出, 两种方法均能准确表征土体在毛细水上升过程中水分场的变化: 土体底部与持水层接触面快速饱和, 随后毛细水将从土体底部向上运移, 直至水分所受重力和毛细力之间形成平衡后, 土体水分场将逐渐稳定。相比TDR湿度传感器, 分布式光纤可更为精准测得湿润锋面的运移规律: 湿润锋面随毛细水上升时间增长而不断上升, 且向上运移速率逐步减小, 并最终达到稳定。

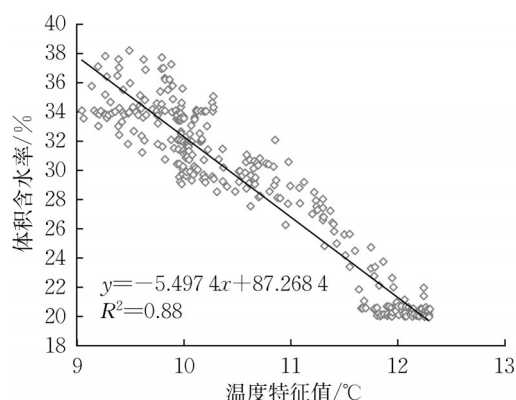


图6 温度特征值与体积含水率的关系

Fig. 6 Relationship between temperature characteristic value and volumetric water content

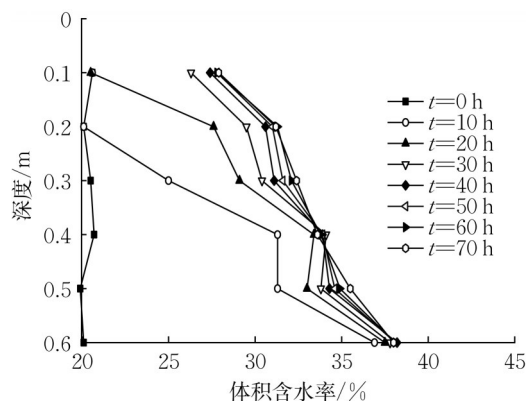


图7 毛细水上升阶段TDR传感器测得的土体湿度变化

Fig. 7 Variation of soil moisture measured by TDR sensors during capillary water rising stage

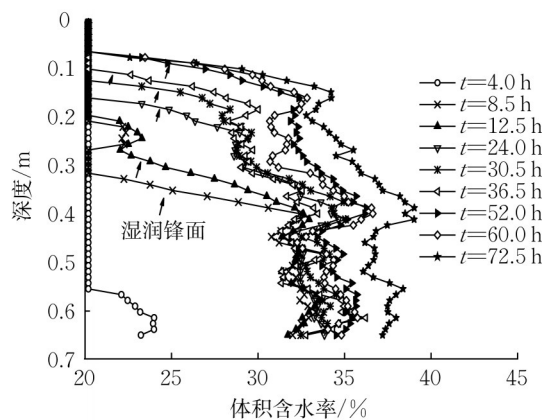


图8 毛细水上升阶段分布式光纤测得的土体湿度变化

Fig. 8 Variation of soil moisture measured by TDR sensors during capillary water rising stage

## 3 试验结果与分析

### 3.1 土体冻融过程温度场分析

土体冻结过程中, 分布式光纤测得不同时刻土

体温度沿深度的分布如图9所示。土体呈典型单端冻结特点,冻结开始时,土体温度与室温接近,约为25℃,冻结结束时,土体顶部温度与冷端空气温度接近,为-15℃,土体底部温度受地温限制较高,为12℃,土体中温度梯度约为45℃·m<sup>-1</sup>。土体的冻结过程可按温度变化速率分为3个阶段:①快速冷却阶段,即冷却模块初始运行时,土体温度自上而下迅速冷却,土体中温度梯度显著增大;②逐步降温阶段,即制冷模块运行后12~100 h,土体中各深度温度均匀下降,温度下降速率约为0.7℃·h<sup>-1</sup>;③稳定平衡阶段,即冻结过程的最后数小时,此时制冷装置输出能量与接地端地热能量相互平衡,土体的温度场变化缓慢并逐步稳定。

土体融化过程中,分布式光纤测得不同时刻土体温度沿深度的分布如图10所示。由图10可见,单面冻结的土体在融化时呈现两端融化的特点,热量从顶部空气端和底部接地端向土体传导,导致土体两端的温度迅速升高,而中部土体在两端土体的保温作用下,温度始终低于两端土体,升温速率缓慢。随着升温过程持续进行,热量逐步向土体中部传导,直至土体内形成新的温度平衡。

图11对比了土柱全深度范围内分布式光纤与铂电阻传感器测试结果,二者相关性极高, $R^2=0.98$ ,均方根误差RMSE=0.90℃。分布式光纤能可靠、精准地测量土体在冻融过程中的温度场,且由于光纤测管具有相比点式传感器更高的空间分辨率,可获取温度沿土柱深度方向的连续分布特征,有助于更精准地掌握土体中温度场的分布,识别土体冻深线、土体温度场梯度等参数。

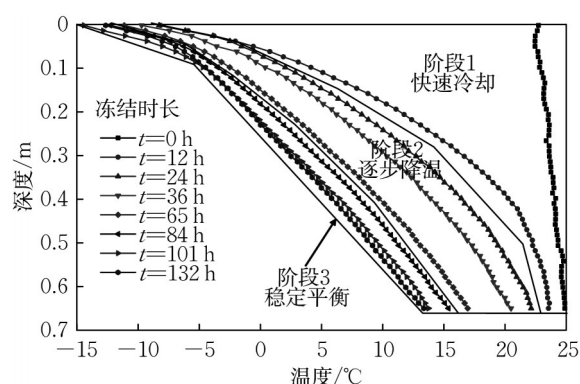


图9 冻结过程中土体温度场变化

Fig. 9 Variation of soil temperature field during freezing process

### 3.2 土体冻融过程湿度场分析

在土体冻融过程中,各层 TDR 湿度传感器测得

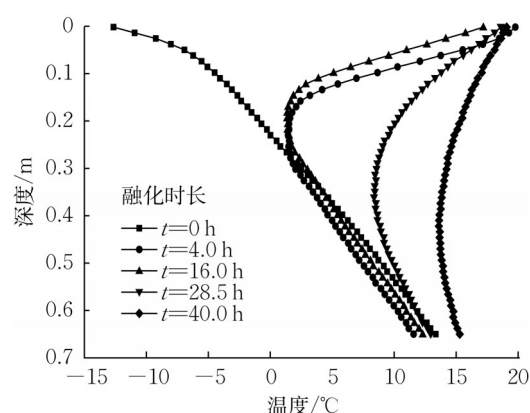


图10 融化过程中土体温度场变化

Fig. 10 Variation of soil temperature field during thawing process

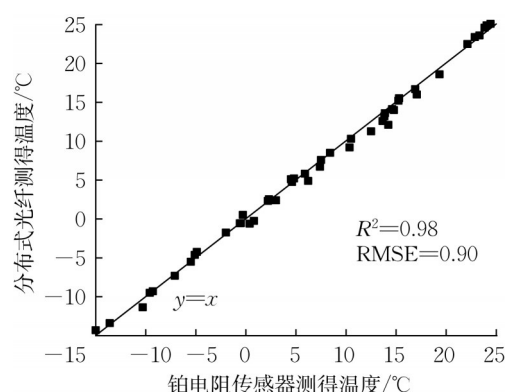


图11 分布式光纤温度感知精度分析

Fig. 11 Analysis of accuracy of distributed optical fiber temperature sensing

的土体体积含水率如图12所示。体积含水率在多数时间保持稳定,而在土体开始冻结到逐渐融化过程中发生改变。研究表明,TDR传感器在土壤冻结过程中测得的体积含水率会随着土体中未冻水含量的下降而明显下降<sup>[31]</sup>,因此可用于反映土体的冻结状态。由图12可见,0.1 m与0.2 m处土体体积含水率分别在45 h和110 h时迅速下降,表明该深度处土体达到冻结状态,且0.1 m埋深处土体冻结时间更长,与温度场分析数据吻合。

由分布式光纤监测得的土体冻融过程湿度场演变云图如图13所示。在冻融过程中,土体中多数区域的土体体积含水率处于稳定状态,与图12规律一致。与TDR测试结果不同的是,主动加热分布式光纤测试结果表明在冻结影响区内出现了体积含水率增大的情况,如图13中虚线框内区域所示。该区域在冻结阶段逐渐扩大,边界逐渐下移,在融化阶段逐渐消失。分析原因可知,对于冻结影响区内土体,



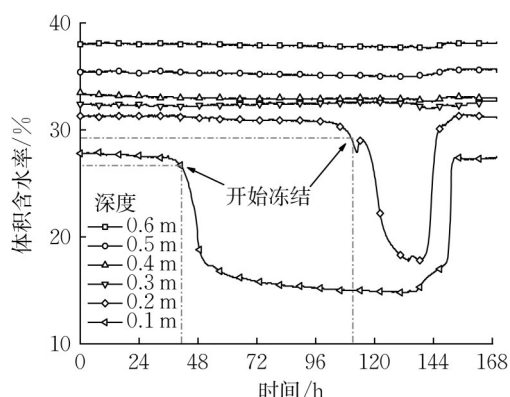


图12 冻融过程TDR传感器测得的土体湿度场变化

Fig. 12 Variation of soil moisture measured by TDR sensors during freezing and thawing

AHFO测试时,测管周围的冻土将瞬时融化,但由于冰水相变时消耗大量能量,致使该区域测得温度特征值较低,进而导致反算得到的土体体积含水率偏高。

根据分布式光纤测温数据和土体冻结温度,可绘制出土体冻深的时程变化曲线,该曲线与冻结影响区的下界面趋势一致,土体最大冻深为0.23 m,约占总柱高度的35%。由图14可见,TDR和分布式光纤湿度场测试数据在土体未冻结时吻合较好,在冻结影响区内存在明显差别,总体拟合优度 $R^2=0.94$ ,相关性较好。与TDR点式传感器相比,分布式光纤可较为准确的识别土体内冻结影响区域范围,得到其在冻融过程中的变化规律。

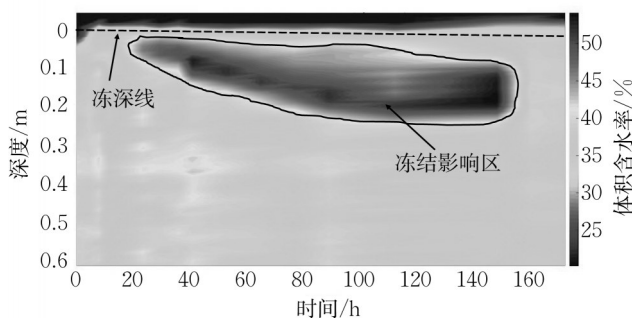


图13 冻融过程分布式光纤测得的湿度场变化过程

Fig. 13 Variation of soil moisture measured by distributed optical fiber during freezing and thawing

分别取冻结阶段开始时(0 h)和土体融化后(168 h)的土体湿度分布数据,对比冻融前后土柱内湿度场分布情况,如图15所示。冻结过程中水热耦合效应引起的湿度场改变,土体中0.3 m与0.4 m

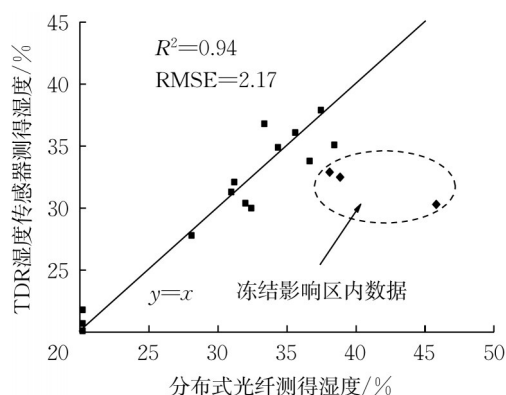


图14 分布式光纤湿度感知精度

Fig. 14 Accuracy of distributed optical fiber moisture sensing

深度处体积含水率有显著变化,0.3 m深度处体积含水率接近稳定冻结锋面下缘,该区域长期存在冻结迁移作用,导致0.3 m处土体体积含水率显著升高。而在0.4 m深度处,土体水分长期向冻结锋面迁移,导致该处体积含水率明显降低。

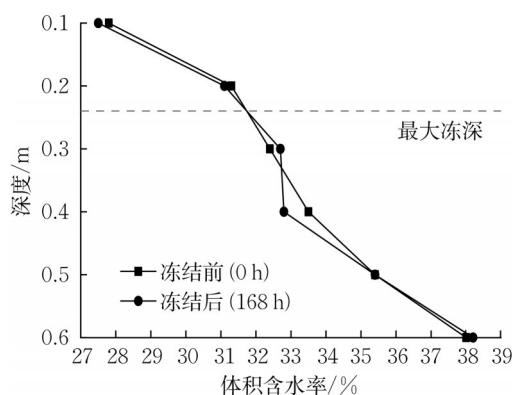


图15 冻融前后土体湿度分布对比

Fig. 15 Comparison of soil moisture distribution before and after freezing-thawing process

### 3.3 土体冻融过程变形量分析

在水热耦合效应作用下,土体在冻融过程中将产生变形。由位移传感器(linear variable differential transformer, LVDT)测得的土体顶面变形量的时程曲线如图16所示。整体来看,土体在冻结过程中,顶面变形量(冻胀量)的变化趋势与温度场、湿度场的变化趋势存在一定关联:冻结初始期,土体表面温度迅速下降,冻结影响区域逐步扩大,引起土体表层冻胀量的迅速增长;随着冷量向下逐步传导,冻结影响区域逐渐稳定,土体冻胀量增长速率也随之变慢;融化期,由于土体顶部温度迅速回升,冻结影响区域迅速减小,导致土体冻胀量快速下降。

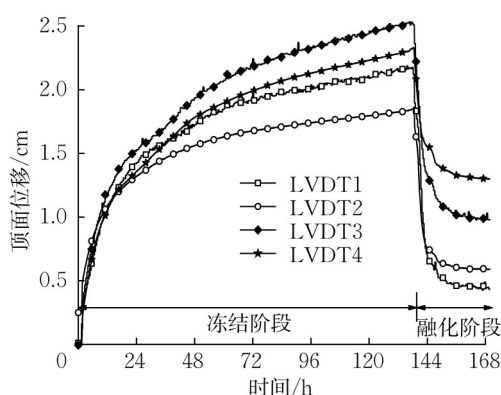


图16 冻融过程土体顶面变形

Fig. 16 Soil deformation of top surface during freezing and thawing

由马氏瓶刻度读取的冻融过程土柱进水量如图17所示。土体冻结阶段,土体内水分受迁移力作用不断向冻结锋面迁移,促使马氏瓶向土体持续补水,补水量随着时间的增长速度先快后慢,与土柱变形量发展趋势基本一致;融化阶段,已冻结土体逐渐融化,冻结迁移力消失,导致土体水分向马氏瓶回流,使得进水量由上升转为下降。在土体内冰逐渐融化、土柱逐渐失水的双重作用下,土柱顶面变形量逐渐下降。由于土体融化较土柱失水过程发生更快,土柱顶面变形量呈现先快速下降,再缓慢下降的特点。

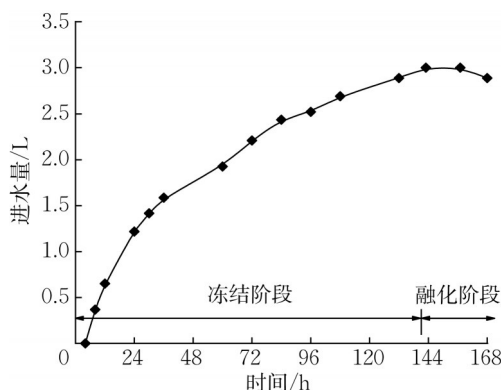


图17 冻融过程土柱进水量

Fig. 17 Water inflow in the soil column during freezing and thawing

在土体冻结过程中,各LVDT测得变形量并不一致,其原因有二:一是由于试验装置在底端单侧供水,靠近供水口和远离供水口位置的土体,水压力存在一定差别,因此土体湿度分布存在一定程度的不均匀,导致冻结过程中产生不均匀变形;二是由于试验填土和压实过程中,土体的压实程度在空间上存

在差别,一定程度也引起了不均匀冻胀变形。各位置冻胀量介于1.8~2.5 cm之间,相当于土体最大冻深的7.8%~10.9%。而在土体融化过程中,各测点位移变化量为1.0~1.8 cm,相当于土体最大冻深的4.3%~7.8%。由于土体结构在冻胀中受到破坏,土中孔隙增多、压实度减小,故土体在冻融后仍存在未恢复的冻胀变形。各测点在完全融化后的残余变形量为0.5~1.4 cm,相当于土体最大冻深的2.2%~6.1%。

## 4 结论

(1)土体冻融多物理场感知室内试验装置通过将加热光纤缠绕至PVC管上制成光纤测管,使分布式光纤空间分辨率提升为2.9 cm,为直埋光纤的34倍。该装置可模拟路基单端冻结、双向融化过程,控制补水量,实现土体温度场、湿度场和变形监测。

(2)土体单端冻结过程中,按降温速率分为快速冷却、逐步降温、稳定平衡3个阶段。融化过程中,土体呈两端融化特征,中部土体在两端土体保温作用下,温度变化速率较低。冻融全过程中,分布式光纤温度测试精确度高,拟合优度 $R^2$ 达0.98。

(3)土体冻结过程中,土体冻结锋面逐渐下移,—15℃单端冻结条件下,最大冻深约占土柱高度的35%。分布式光纤可识别土体内冻结影响区域范围,得到其在冻融过程中的变化规律,湿度监测拟合优度 $R^2$ 达0.94。由于水热耦合效应,土体内自由水受冻胀迁移力影响向冻结锋面移动,引起冻融前后土体内湿度场的重分布。

(4)冻结过程中,土体湿度场和压实程度的不均匀性导致土柱顶部不均匀冻胀变形,占土体最大冻深的7.8%~10.9%;融化过程中,土体变形减小明显,变化量占土体最大冻深的4.3%~7.8%;完全融化后,土体因冻融导致的结构破坏,仍存在2.2%~6.1%的残余变形。

### 作者贡献声明:

凌建明:指导研究工作,修改论文。

张 玉:数据处理和论文撰写。

钱劲松:明确论文框架,修改论文。

吴振吉:室内试验和数据采集。

郑纯宇:图表绘制。



## 参考文献:

- [1] LIN Z J, NIU F J, LI X L, *et al.* Characteristics and controlling factors of frost heave in high-speed railway subgrade, northwest China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153 (9) : 33. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.001.
- [2] QI J, VERMEER P A, CHENG G. A Review of the influence of freeze - thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17 (3) : 245. DOI: 10.1002/ppp.559.
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2021.03.001.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research·2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2021.03.001.
- [4] 郭君仪, 孙梦雅, 施斌, 等. 不同环境温度下土体含水率主动加热光纤法监测试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4137. DOI: 10.16285/j. rsm. 2020.0516.
- GUO Junyi, SUN Mengya, SHI Bin, *et al.* Experimental study of water content in soils monitored with active heated fiber optic method at different ambient temperatures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4137. DOI: 10.16285/j. rsm. 2020.0516.
- [5] 寇璟媛, 马新岩, 滕继东, 等. 基于孔隙结构的土体未冻水含量滞回效应研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 115. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2020.09.012.
- KOU Jingyuan, MA Xinyan, TENG Jidong, *et al.* Hysteresis effect of unfrozen water content in soil based on pore structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 115. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2020.09.012.
- [6] KUANG K S C, CANTWELL W J. Use of conventional optical fibers and fiber bragg gratings for damage detection in advanced composite structures: a review [J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56 (5) : 493. DOI: 10.1115/1.1582883.
- [7] ISMAIL D S A, KASSIM A. Monitoring of deformation behaviour of unsaturated soil slope using distributed optical fibre sensor [J]. International Journal of Integrated Engineering, 2020, 12(9): 199. DOI: 10.30880/ijie. 2020.12.09.024.
- [8] ZHAO H, WU D, ZENG M, *et al.* A vibration-based vehicle classification system using distributed optical sensing technology [J]. Transportation Research Record, 2018, 2672 (43): 12.
- [9] SU H, TIAN S, KANG Y, *et al.* Monitoring water seepage velocity in dikes using distributed optical fiber temperature sensors [J]. Automation in Construction, 2017, 76 (4) : 71. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.013.
- [10] 席军强, 陈宏宇. 基于分布式光纤测温的离合器摩擦表面温度场测量[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 102. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2020.08.011.
- XI Junqiang, CHEN Hongyu. Temperature field measurement of friction surface of a dry clutch based on distributed fiber-optic temperature measurements [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 102. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2020.08.011.
- [11] LIAO W, ZHUANG Y, ZENG C, *et al.* Fiber optic sensors enabled monitoring of thermal curling of concrete pavement slab: temperature, strain and inclination [J]. Measurement, 2020, 165 (1) : 108203. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108203.
- [12] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 地面沉降分布式光纤监测土 - 缆耦合性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1670.
- ZHANG Chengcheng, SHI Bin, ZHU Honghu, *et al.* Theoretical analysis of mechanical coupling between soil and fiber optic strain sensing cable for distributed monitoring of ground settlement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1670.
- [13] HUANG X, WANG Y, SUN Y, *et al.* Research on horizontal displacement monitoring of deep soil based on a distributed optical fibre sensor[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 65(2): 158. DOI: 10.1080/09500340.2017.1382594.
- [14] 沈圣, 吴智深, 杨才干, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的盾构隧道横截面收敛变形监测方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 104. DOI: 10.15951/j. tmgb. 2013.09.005.
- SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, *et al.* Convergence deformation monitoring of shield tunnels based on distributed optical fiber strain sensing technique [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (9) : 104. DOI: 10.15951/j. tmgb. 2013.09.005.
- [15] 曹鼎峰. 土壤含水率分布式光纤测量试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- CAO Dingfeng. An experiment study on distributed fiber optic sensing technology for the measurement of soil water content [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [16] 王家琛, 朱鸿鹄, 王静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 147.
- WANG Jiachen, ZHU Honghu, WANG Jing, *et al.* Laboratory model tests on capillary barrier infiltration using actively heated fiber optic method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 147.
- [17] TARNAWSKI V R, LEONG W H. A series-parallel model for estimating the thermal conductivity of unsaturated soils [J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33 (7) : 1191. DOI: 10.1007/s10765-012-1282-1.
- [18] TARNAWSKI V R, GORI F. Enhancement of the cubic cell soil thermal conductivity model [J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(2): 143.
- [19] CIOCCA F, LUNATI I, GIESEN N V D, *et al.* Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: a lysimeter experiment [J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(4): 1. DOI: 10.2136/vzj2011.0199.

- [20] ABU-HAMDEH N H, REEDER R C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285. DOI: 10.2136/sssaj2000.6441285x.
- [21] SAYDE C, GREGORY C, GIL-RODRIGUEZ M, *et al.* Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics [J]. Water Resources Research, 2010, 46(6): 2840. DOI: 10.1029/2009WR007846.
- [22] MINARDO A, CATALANO E, ZENI L, *et al.* Measurement of moisture content in masonry materials by active distributed optical fiber sensors [C] // Photonic Technologies: 18th Italian National Conference. Fotonica: IET, 2016: 1-3.
- [23] CAO D, SHI B, ZHU H, *et al.* A distributed measurement method for in-situ soil moisture content by using carbon-fiber heated cable [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(6): 700. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.08.003.
- [24] 曹鼎峰, 施斌, 闫继送, 等. 土的含水率C-AHFO法现场长期分布式监测可行性研究[J]. 工程地质学报, 2018(2): 431. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016-548.  
CAO Dingfeng, SHI Bin, YAN Jisong, *et al.* Distributed field soil moisture using C-AHFO method: longterm monitoring and feasibility [J]. Journal of Engineering Geology, 2018(2): 431. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016-548.
- [25] CAO D, SHI B, ZHU H, *et al.* Performance evaluation of two types of heated cables for distributed temperature sensing-based measurement of soil moisture content [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(2): 212. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.09.005.
- [26] STRIEGL A M, LOHEIDE S P. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring [J]. Ground Water, 2012, 50(3): 340. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00928.x.
- [27] CAO D, SHI B, ZHU H, *et al.* A soil moisture estimation method using actively heated fiber bragg grating sensors [J]. Engineering Geology, 2018, 242: 142. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.05.024.
- [28] STRIEGL A M. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring [J]. Ground Water, 2012, 50(3): 340. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00928.x.
- [29] 曹鼎峰, 施斌, 严珺凡, 等. 基于C-DTS的土壤含水率分布式测定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 910.  
CAO Dingfeng, SHI Bin, YAN Junfan, *et al.* Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 910.
- [30] YAO Y S, ZHENG J L, CHEN Z S, *et al.* Field measurements and numerical simulations of temperature and moisture in highway engineering using a frequency domain reflectometry sensor [J]. Sensors, 2016, 16(6): 847. DOI: 10.3390/s16060857.
- [31] PATTERSON D E, SMITH M W. The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry: results from laboratory tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 18(1): 131. DOI: 10.1139/t81-012.