

DOI: 10.11779/CJGE201405015

基于 C-DTS 的土壤含水率分布式测定方法研究

曹鼎峰¹, 施斌^{1*}, 严珺凡¹, 魏广庆²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 基于碳纤维加热光缆的分布式测温系统(简称 C-DTS), 提出了一种土壤含水率分布式测定方法。该方法采用 C-DTS 测试系统, 对埋设在土壤中的碳纤维加热光缆的温度变化进行测定, 利用其升温过程中的温度特征值与含水率之间的关系进行分布式测定土壤中的含水率。定义了温度特征值 T_t , 通过试验证明了 T_t 与含水率 w 之间存在线性关系, 相关参数可通过标定试验确定。试验结果表明: 采用碳纤维光缆人为加热的方法, 可有效地测定土壤含水率; 而 DTS 技术的应用, 可实现土壤含水率分布式测量; 此方法的测量精度与温度特征值的选取有关。

关键词: 土壤; 含水率; DTS; 碳纤维加热光缆; 分布式监测

中图分类号: TU441.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)05-0910-06

作者简介: 曹鼎峰(1988-), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及分布式监测技术等方面的研究。E-mail: caodingfeng12@163.com。

Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS

CAO Ding-feng¹, SHI Bin¹, YAN Jun-fan¹, WEI Guang-qing²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, China)

Abstract: Based on the carbon-fiber-heating-cable distributed temperature sensing system (C-DTS), a new distributed method for measuring the moisture content of soils is proposed. The temperature of soil-buried-cable is measured by C-DTS in this method. The moisture content of soils is determined by the relationship between the temperature characteristic value (T_t) and the moisture content. T_t is defined, and it is proved that there is a linear relationship between the moisture content and T_t . The relevant parameters can be determined by calibration experiment. The experimental results show that the moisture content of soils can be measured effectively through artificial heating carbon-fiber-cable, and the usage of DTS provides distributed measurement. The accuracy of this method is related to the section of T_t . The success of the proposed method provides a very advanced distributed approach for measuring the moisture content of soils. Further improvement and popularization are required.

Key words: soil; moisture content; DTS; carbon fiber heating optical cable; distributed sensing

0 引言

土壤含水率是农业生产中十分重要的物理量,也是影响工程土体稳定性的重要因素^[1-3],因此,对土壤中含水率的测量是地质与岩土工程防灾减灾中必不可少的工作。

关于土壤含水率的测定,目前主要有3种方法:烘干法、电阻法、时域反射法(TDR)。

烘干法是土中含水率测量最常用和简便的方法,其原理是根据土样烘干前后质量变化确定含水率,然而,这种方法需要取样烘干,因此它适合于实验室测试,很难对原位土体尤其是深部原位土体的含水率测量。另外,即使取到合适的原位土样,在土样取样、搬运和存储过程中也难免失去一定水分,从而造成土

中含水率测试结果产生偏差。

电阻法的原理是通过测量埋入土壤中的两个电极之间电阻来确定含水率,但由于土中的电阻受孔隙分布、颗粒成分影响而使该方法测量结果误差较大^[4-5],另外,该方法使用前的标定结果容易随时间失效,因此,在岩土工程中还不能普遍推广。

TDR 技术测量土中含水率的原理是通过测量电磁波在埋入土壤中导线入射和反射之间的时间差来求

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAK10B05); 国家自然科学基金重点项目(41230636); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB710605)

收稿日期: 2013-09-10

*通讯作者

土壤介电常数, 利用介电常数确定含水率, 这一方法首先由 Dalton 等人于 1984 年提出^[6], 30 a 来这一技术得到了较快发展, 目前它是测量原位土体含水率比较常用的方法^[7]。但该方法的测量结果受到土壤化学特性和环境因素的影响, 测量精度和稳定性不高^[8]。此外, 因为探头几乎无法安装到深部土体, 所以难以对深部原位土进行含水率测量。

上述 3 种方法除了难以测量原位土含水率, 标定复杂, 稳定性差等不足外, 它们均属于点式测量, 还无法对土体原位含水率进行分布式测量。因此, 十分需要研发一些新型测试手段对土壤含水率进行原位分布式测量。

分布式光纤传感技术近年来得到了迅速发展, 其分布式, 长距离, 防腐蚀, 抗干扰等突出优点, 使这类技术在实际工程监测中不断得到推广和应用。其中, 基于先进的拉曼光时域反射测量技术 (ROTDR) 的分布式光纤温度测量系统 (DTS), 在电力、隧道、输油管道、火灾预警等方面已得到广泛应用^[9-11], 并开始在大坝和地质体渗流监测中不断推广应用^[12], 而在土壤含水率测定方面未见报道。

针对烘干、电阻、TDR 法测量含水率时的不足, 采用碳纤维加热光缆的分布式测温系统 (简称 C-DTS), 提出了一种土壤含水率分布式测定方法, 并通过室内试验对该方法的可行性进行了论证。

1 基本原理

基于 C-DTS 的土壤含水率分布式测定方法的基本原理是采用 C-DTS 测试系统, 对埋设在土壤中的碳纤维加热光缆的温度变化进行测定, 利用其升温过程中的温度特征值与含水率之间的关系进行分布式测定土壤中的含水率。进一步解释为: 土壤热传导性能随含水率而发生变化, 含水率越高, 其热传导能力越强。将具有内加热功能的碳纤维温度感测光缆植入土壤中, 通电后碳纤维光缆发热, 温度升高, 但在含水率越高的部位, 其升温速率越慢, 通过测量加热一定时间的光缆温度即可得到温度特征值, 据此来测量土壤中的含水率。

2 温度特征值定义及 C-DTS 系统设计

2.1 温度特征值的定义

为了提高 C-DTS 的可靠度, 降低测量误差, 本文提出了温度特征值的概念。温度特征值定义为: 加热光缆周围形成的温度场梯度不再改变时, 选取某个特征时间区间 $[t_1, t_2]$, 在特征时间区间 $[t_1, t_2]$ 内的等时间间隔所测得的温度值的算数平均值称之, 用 T_i 表

示, 计算公式为

$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i)}{n}, \quad (1)$$

式中, T_i 为温度特征值, T_i 为特征时间区间 $[t_1, t_2]$ 内的等时间间隔所测得的温度值, n 为特征时间区间内温度的测量次数。

2.2 T_i 与含水率 w 之间的关系

碳纤维内加热光缆升温过程中 T_i 与土壤含水率 w 之间的关系推导如下:

假设待测土壤具有均匀性、各向同性, 可将此类热量传输问题简化为一维问题。选取单位长度光缆, 根据欧姆定律, 该单位长度光缆在单位时间内产生的能量为

$$Q_1 = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (2)$$

式中, Q_1 为单位长度光缆单位时间产生的能量, U 为单位长度光缆两端所加电压, R 为单位长度光缆的电阻, I 为电流。因 R 和 I 都为常数, 所以 Q_1 也为常数。根据传热学中傅里叶定律可知^[13], 单位长度光缆在单位时间内散失的热量为

$$Q_2 = \vec{\psi} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial u} n_0. \quad (3)$$

式中 Q_2 为单位长度光缆单位时间内散射的能量; $\vec{\psi}$ 为光缆表面热流密度; λ 为导热系数, 是与土体本身性质相关的标量; $\frac{\partial T}{\partial u} n_0$ 为温度梯度。根据能量守恒定律, 单位时间内用于碳纤维光缆加热的能量表示为

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 = c_m (T - T_0), \quad (4)$$

式中, Q_3 为用于加热碳纤维光缆的能量, c_m 为光缆比热容, T_0 为加热前光缆的初始温度, T 为加热后光缆的实测温度。将式 (2) ~ (4) 联立可得

$$I^2 R - c_m (T - T_0) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} n_0. \quad (5)$$

由式 (5) 通过数学推导, 求出 λ 的表达式为

$$\lambda = \frac{c_m}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0} T - \frac{c_m}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0} T_0 - \frac{I^2 R}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0}. \quad (6)$$

当温度场稳定后, 由待测土的各向同性和均匀性可知, 温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial u} n_0$ 为常数, 所以式 (6) 可简化为

$$\lambda = k_0 T + b_0, \quad (7)$$

式中, $k_0 = \frac{c_m}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0}$, $b_0 = -\frac{c_m}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0} T_0 - \frac{I^2 R}{\frac{\partial T}{\partial u} n_0}$, k_0 , b_0 均为常数。

又因为土体由气、固、液三相组成,而气体的导热系数相对于液体和固体来说非常小,故在本文中忽略不计。土体导热系数可写成

$$\lambda = \lambda_w + \lambda_s, \quad (8)$$

其中, λ_w 为水溶液的导热系数, λ_s 为固体的导热系数。 λ_w 的大小与土中含水率呈现正相关的关系,即土中含水率越大,其导热能力越强。当温度场稳定后,土中相邻位置的固体和液体之间温度相等,相互之间的热量传递可忽略不计,所以 λ_w 与土体含水率可近似认为成正比关系,即

$$\lambda_w = aw, \quad (9)$$

式中, a 为常数, w 为土中含水率。联立式(7)~(9),可得

$$w = \frac{k_0}{a}T + \frac{\lambda_s}{a} + \frac{b_0}{a}, \quad (10)$$

进一步整理可得

$$w = k_1T + b_1, \quad (11)$$

式中, $k_1 = \frac{k_0}{a}$, $b_1 = \frac{\lambda_s}{a} + \frac{b_0}{a}$, k_1 , b_1 均为常数。从式

(11) 可看出,当加热时间相同时,光缆温度与周围介质含水率成一次函数关系。在实际应用过程中若选取某一时刻的温度值进行计算,由于土体不均匀、测试系统不稳定造成的误差较大。因此,需要选取加热过程中某个时间区间的温度值来代替某个时间点的值进行分析。由温度特征值定义的式(1)、(11)可知

$$w = k \frac{\sum_{i=1}^n (T_i)}{n} + b, \quad (12)$$

即有

$$w = kT_l + b, \quad (13)$$

其中, k , b 为常数。从式(13)可看出,碳纤维加热光缆的温度特征值 T_l 与土中含水率 w 成线性函数关系。因此,可通过测量温度特征值来计算土壤中含水率。这里需要说明,对于同一种土体,当加热功率恒定时, k , b 为常数,但是对于不同类型的土体,上述参数则不同,需要进一步确定,建议在现场测量原位土体含水率时对 C-DTS 系统各参数进行现场标定。

2.3 DTS 测温原理

在采用本方法对土中含水率进行测定时,需要拉曼光时域反射测量计(ROTDR)对碳纤维加热光纤的温度变化进行分布式测量。ROTDR 的测量原理是:一定能量的脉冲泵浦光注入光纤后,光子与光纤分子产生碰撞,产生声波,光子与声子的非弹性碰撞发生拉曼散射,产生 2 个不同波长的分量。波长大于入射光的分量叫斯托克斯反射光,波长小于入射光的分量叫做反斯托克斯分量^[14-15]。这 2 个分量的光强度比值

和光纤温度存在着如下关系:

$$R(T) = \frac{I_F}{I_S} = \left(\frac{\nu_F}{\nu_S} \right)^4 e^{\frac{-h\nu}{KT}}. \quad (14)$$

式中 $R(T)$ 为待测温度的函数; I_F 为反斯托克斯光强; I_S 为斯托克斯光强; ν_F 为反斯托克斯光频率; ν_S 为斯托克斯光频率; c 为真空中的光速; ν 为拉曼平移量; h 为普朗克常量; K 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度。

光纤上任意一点至脉冲光注入端的距离可为

$$X = \frac{cT}{2n}. \quad (15)$$

结合式(14)、(15)可实现对光纤沿线的温度进行分布式测量,并能准确定位。

2.4 碳纤维加热光缆

为了提高感测光纤对土壤含水率的敏感度,提高 C-DTS 系统测量精度,使光缆加热过程中能够均匀受热,课题组设计的 C-DTS 中,采用了苏州南智传感科技有限公司生产的碳纤维内加热型感测光缆,其型号为 NZS-DTS-C11。从内到外依次为光纤、碳纤维、纤维护套,其中光纤包括纤芯、包层、涂覆层、光纤护套,如图 1 所示。

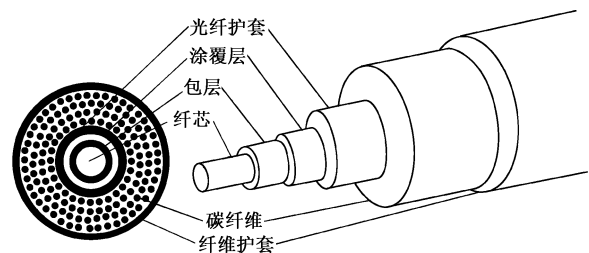


图 1 NZS-DTS-C11 结构示意图

Fig. 1 Diagram of NZS-DTS-C11

2.5 C-DTS 土壤含水率分布式测量系统

本文中设计的 C-DTS 系统包括加热系统、感测系统、解调系统、数据处理系统 4 部分构成。加热系统由碳纤维、通电导线、加热电源构成,感测元件为多模光纤,解调系统主要由 DTS 解调设备构成,数据处理系统主要由安装了计算特征值软件的电脑、显示器构成。上述各系统的协同工作过程如图 2 所示。

首先加热系统对埋入土壤中光缆通过碳纤维导电加热,同时感测系统对光缆升温过程中不同温度对应的光信号进行感测,并将感测到的光信号数据传输给解调系统,解调系统将光学信号解调成实测温度信号 T ,并将实测温度数据传输给数据处理系统,最后数据处理系统由实测温度 T 计算温度特征值 T_l ,并由 T_l 和含水率 w 之间线性关系计算出待测土壤的含水率 w 。

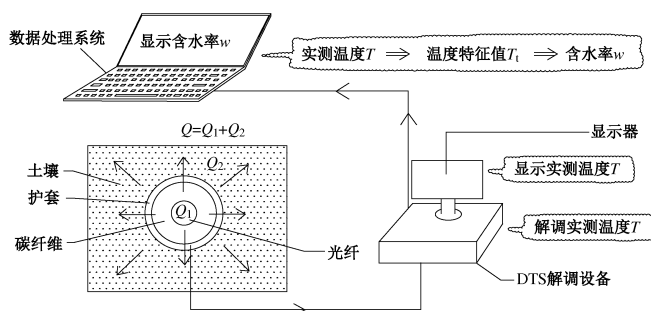


图2 C-DTS 系统工作过程示意图

Fig. 2 Working process of C-DTS system

3 方法的验证

本文中所设计的室内试验,旨在验证 C-DTS 法用于测量土壤含水率的可行性、可靠性和优越性。同时,对 w 与 T_i 之间一次函数 $w = kT_i + b$ 的系数 k , b 进行标定,研究 T_i 的选取方式对含水率精度的影响。

3.1 方案设计

本次含水率测定试验,其基本配置如图3所示。为了增大 C-DTS 系统测量的空间分辨率,将碳纤维光缆缠绕在 PVC 管上制作成测管。

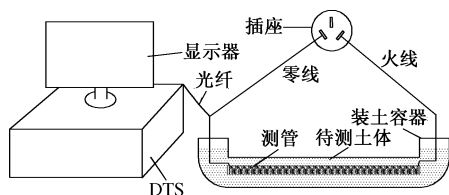


图3 试验基本配置

Fig. 3 Basic configuration of tests

测量设备包括 DTS 测温仪、碳纤维加热光缆、装土容器、电线、插座、测管。DTS 选用苏州南智传感科技有限公司生产的 NZS-DTS-M6,其空间分辨率为 1 m,温度精度为 0.1°C ,最大测量距离为 6 km。碳纤维加热光缆碳纤维直径为 3 mm,护套材料绝缘,内部碳纤维导体的电阻率为 $19.4 \Omega/\text{m}$ 。测管内部为直径 5 cm 的 PVC 管,长度为 0.7 m,管外缠绕碳纤维加热光缆,光缆总长度为 33.63 m。

3.2 试验过程

本次室内试验步骤主要包括接电、测管制作、土样制备和装入、测量,如图4所示。

首先,通过刀片划开碳纤维光缆橡胶护套,将导线和已去护套光缆固定,用电工胶带做绝缘处理;其次,配置不同含水率的土壤样,装入 PVC 容器中,装入土样时应确保测管处于 PVC 容器中心位置;最后将光纤接入分布式光纤测温仪。在 DTS 测温前,首先需要根据环境温度对其标定,待标定完成后将测管上电线并联接入家庭电路,使测管对周围土体加热的时候

传感自身的温度变化。本试验中光缆上所加电压为 7.33 V/m ,每组试验加热时间都规定为 180 min,试验结束后,断开电源,剪断光纤,清空 PVC 容器后装入下一组含水率的土样,重复上述步骤进行测量。

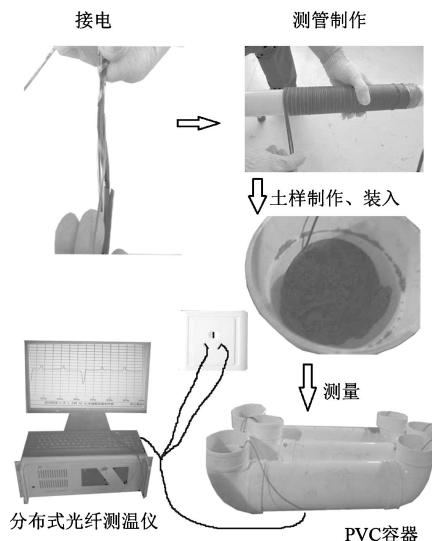


图4 试验装置安装过程

Fig. 4 Installation process of test device

土壤的热传导特性主要与土颗粒大小、含水率、干密度有关^[13],本次室内试验所选用土壤的上述指标为有效粒径 d_{10} 为 0.13 mm,限制粒径 d_{60} 为 0.29 mm,干密度 ρ 为 1.21 g/cm^3 ,饱和含水率 w_{sat} 为 22.9%,土样的不均匀系数为 2.23,属于级配不良土体中的砂性土。因其饱和含水率为 22.9%,故可分别配制含水率为 5%,10%,15%,20%的土样依次用 C-DTS 系统测量,将测量结果 T 换算成温度特征值 T_i ,标定出该温度特征值与上述 4 个已知含水率之间的线性函数系数。

4 试验结果分析

4.1 升温时程曲线特征分析

因为本文设计的试验中每条测管上都绕有长度为 33.63 m 的光缆,DTS 解调仪采样间隔为 1 m,故可从一条测管上获取等距离的 33 个温度数据,又因为整条测管都置于具有相同含水率的装土容器中,故可将测管上 33 个采样点每一时刻的平均温度作为该时刻光缆的温度,将测管升温时程曲线绘制如图5所示。

从图5可看出,在通电开始后的前 30 min,不同含水率土壤对应的升温曲线彼此之间区分度不高,升温规律也不一致,主要是由于刚通电时,测管周围形成的温度场不稳定造成。30 min 后,可清晰地看出在任一时刻,含水率越高的土壤,其对应的测管温度越低,测管温度与周围介质含水率呈现很好的负相关关系。在应用时可通过时程曲线初步判断含水率范围。

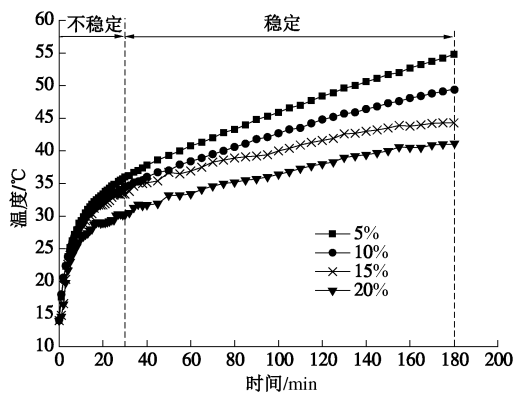


图 5 不同土体含水率下测管升温时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of heating of measuring tube under different moisture contents

4.2 T_t 与 w 之间关系的确定

由温度特征值定义可知，其大小受到所选取特征时间区间 $[t_1, t_2]$ 控制，因此在讨论温度特征值时需先说明选取的时间区间。特征时间区间下限 t_1 由土壤本身属性决定，为碳纤维光缆周围形成的温度场梯度不再改变的时刻，上限 t_2 根据测量精度要求而定，一般 t_2 越大，即测量时间越长，测量精度越高。本文中分别选取 30~60, 30~90, 30~120, 30~150, 30~180 min 时间区间，将温度特征值与含水率的关系绘制如图 6 所示。

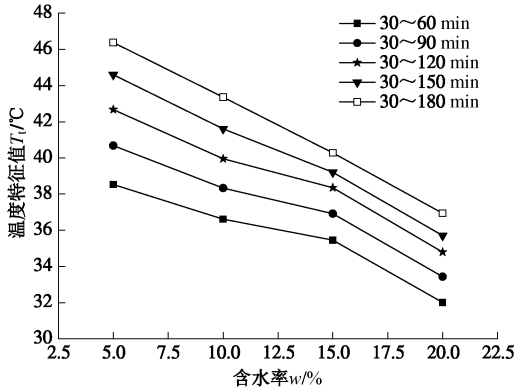


图 6 不同时间区间上光缆温度特征值与土壤中含水率关系

Fig. 6 Relationship between T_t and w of soils at different time intervals

由图 6 可看出，选取时间区间越长，光缆温度特征值越稳定，含水率与特征值线性关系越明显。对图 6 中各时间区间上温度特征值 T_t 与含水率 w 之间关系进行线性拟合，拟合后表达式为

$$\left. \begin{aligned} w_{30-60 \text{ min}} &= -0.5142T_t + 30.83, \\ w_{30-90 \text{ min}} &= -0.5532T_t + 33.13, \\ w_{30-120 \text{ min}} &= -0.5648T_t + 33.25, \\ w_{30-150 \text{ min}} &= -0.6819T_t + 38.48, \\ w_{30-180 \text{ min}} &= -0.7004T_t + 39.67. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

从式 (16) 可看出，当选取的特征时间区间不同时，所标定的温度特征值与含水率之间一次函数系数

也不同，其精度也不同，特征时间区间长短对含水率测量精度的影响还需通过试验进一步验证。

4.3 C-DTS 法现场原位测试应用

利用 C-DTS 系统测试现场原位土壤的含水率时，应遵从以下步骤。首先，根据实际需要在待测区域开挖土槽或者钻孔，土槽主要用于埋置测量平行地表方向上各个区域土壤含水率，钻孔主要用于测量垂直地表方向上土壤不同深度处含水率；其次，埋入感测光缆，并将开挖的土槽、钻孔进行回填，尽量保证回填土和原状土具有相同的干密度；最后，将各段光缆进行串联后接入 C-DTS 测量系统进行测量，在测量前最好能在现场对式 (13) 中系数进行一次标定和修正。测量结束后光缆可永久植入土壤中，用于以后往复性的测量。

5 误差分析

为了验证本文中提出的 C-DTS 法测量土壤含水率时的可行性，分析由不同时间区间上选取的温度特征值计算出的土壤含水率的精度。误差分析过程仍选取确定温度特征值和含水率关系试验过程中所采用的土体，但是含水率未知，分别用烘干法和本文中 C-DTS 系统进行测量，将烘干法测量结果作为准确值，来确定 C-DTS 系统测量过程中产生的绝对误差。

经烘干法测量，待测土壤含水率为 8%，分别选取特征时间区间 30~60, 30~90, 30~120, 30~150, 30~180 min，计算各个区间上取得的温度特征值，将其代入式 (16) 进行计算，计算结果见表 1。

表 1 不同时间区间由温度特征值计算的含水率比较

Table 1 Comparison of moisture contents calculated by T_t at different time intervals

时间区间 /min	测量时间/min	含水率/%	绝对误差 /%
30~60	60	11.23	3.23
30~90	90	10.92	2.92
30~120	120	9.68	1.68
30~150	150	8.96	0.96
30~180	180	8.13	0.13

由表 1 可见，选取的特征时间区间越长，通过特征值计算的土壤含水率绝对误差越小，该结果与图 6 中时间区间越长其特征值与含水率之间线性关系更明显一致，在岩土和地质工程中推荐选取特征时间区间为 30~180 min，即测量时间选为 180 min 时可满足工程要求。

需要说明的是，在选取特征时间区间时，其下限值推荐取 30 min，若取值过小则会造成测量误差较大，若取值过大则造成时间浪费。当土壤中含水率较小(小于 5%) 时，由于土体中强结合水的影响，使测量结果误差较大，因此，C-DTS 法使用范围为 $[5\%, w_{sat}]$ 。另外，在岩体中，水分主要以孔隙水、裂隙水形式存

在,此时,该方法可以准确判断裂隙是否充水,但是无法判断其岩体含水率。

6 结 论

本文提出了基于碳纤维加热光缆的土壤含水率分布式测量的方法,设计了测量土壤含水率的 C-DTS 系统,对不同含水率土壤进行了室内试验,对温度特征值 T_l 与含水率 w 之间的线性关系系数进行了标定,并得到如下 5 点结论。

(1) 采用碳纤维加热光缆,通过对感测光缆的主动加热,使碳纤维感测光缆与周围土壤产生较大的温差,大大提高了 DTS 对土壤含水率敏感性和精度。

(2) 提出了温度特征值的概念,并在试验的基础上,获得了温度特征值 T_l 与含水率的关系: $w = kT_l + b$ 。根据这一关系,可以对土壤含水率进行分布式测量,同时也验证了 C-DTS 分布式测量土壤含水率的可行性。

(3) 通过碳纤维加热光缆升温过程中温度特征值计算土中含水率时,选取的时间区间越长,计算出的含水率精度越高,为了保证其精度,工程应用中测量时间推荐为 30~180 min。

(4) 本文提出的基于 C-DTS 测量土壤含水率的方法主要适用于黏性土、砂性土,软土,对于粒径大于 2 mm 的砾粒、软岩、硬岩中含水率的测量则不适宜。

(5) C-DTS 法测量土壤含水率范围为[5%, w_{sat}],即可测量的最小值大约为 5%,最大值则为其饱和含水率。

本文所提出的 C-DTS 土壤含水率分布式测量方法为土壤含水率的测量提供了一种新的方法,但将这一方法真正应用于实际测量,还有大量的研究需要开展,如土壤成分、密度、温度场边界条件、测量时间等因素对测量结果的影响等,相关研究正在进行中。

参考文献:

- [1] QI Jian-feng, SONG Xue-lin, LIU Ji-chao. A study on the effects of water content on strength parameters of landslide soil[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **170** - **173**: 785 - 788.
- [2] NIAN Ting-kai, FENG Zhong-kai, YU Peng-cheng, et al. Shear test on mixed slide-zone soils of landslide under different water content[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **301**: 1208 - 1213.
- [3] WANG Cheng-liang, BAI Ming-zhou, KUANG Xing. Study on risk assessment method of water bursting disaster in railway tunnel[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **90**: 2408 - 2413.
- [4] DAILY W, RAMIREZ A, LABRECQUE D, et al. Electrical resistivity tomography of vadose water movement[J]. *Water Resources Research*, 1992, **28**(5): 1429 - 1442.
- [5] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, **46**(1): 45 - 70.
- [6] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS D S, et al. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe[J]. *Science*, 1984, **224**(4652): 989 - 990.
- [7] WOJCIECH S, ANDRZEJ W, OLGA A. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements[J]. *Sensors and Actuators*, 2008, **147**(2): 544 - 552.
- [8] SKIERUCHA W. Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique[J]. *International Agrophysics*, 2000, **14**: 417 - 426.
- [9] HU Chuan-long, WANG Jing-feng, ZHANG Zai-xuan, et al. Research on distributed temperature sensor(DTS) applied in underground tunnel[C]// 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Application, 2011, **8199**(16): 1 - 6.
- [10] ZHANG Xi, FAN Tian-nan. The research of distribute temperature monitoring system early warning fire in coal belt conveyor[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **548**: 890 - 892.
- [11] GROSSWIG S, HURTIG E, KÜHN K, et al. Distributed fiber-optic temperature sensing technique(DTS) for surveying underground gas storage facilities[J]. *Oil Gas European Magazine*, 2002, **27**(4): 31 - 34.
- [12] COTÉ A, CARRIER B, LEDUC J, et al. Water leakage detection using optical fiber at the peribonka dam[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2007, **175**(59): 1 - 12.
- [13] 王晓东. 传热学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2008 (WANG Xiao-dong. *Transferts thermiques*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008 (in Chinese))
- [14] 林玉兰, 陈永泰. 拉曼散射分布式光纤温度传感器的设计[J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(2): 33 - 36. (LIN YU-lan, CHEN Yong-tai. Design of a raman scattering distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(2): 33 - 36. (in Chinese))
- [15] 张 丹. 基于 BOTDR 的分布式光纤传感技术及其在工程健康监测中的应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2004. (ZHANG Dan. BOTDR-based distributed optical fiber sensing and its application into engineering health monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University, 2004. (in Chinese))