

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.016

基于 FDR 技术的土体质量含水率和干密度快速检测方法

周建平¹,李 银¹,臧耀辉²,毛航宇²,王明阳¹,王柳江²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司,四川 成都 610081; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为解决现有烘干法和环刀法测定土体质量含水率和干密度存在的周期长、扰动大的问题,提出一种基于频域反射(FDR)技术的快速无损检测方法。基于介电常数、电导率与质量含水率和干密度的关系式,利用电导率与介电常数的拟合关系,推导出质量含水率和干密度的求解公式。参数率定试验和模拟土体填筑的模型试验表明,提出的质量含水率与干密度快速测定方法合理可行,具有较高的测试精度。

关键词:频域反射技术;介电常数;质量含水率;干密度;压实质量

中图分类号:TU41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)06-0123-07

A method for quick detection of soil moisture content and dry density rapidly based on frequency domain reflectometry technology

ZHOU Jianping¹, LI Yin¹, ZANG Yaohui², MAO Hangyu², WANG Mingyang¹, WANG Liujiang²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The traditional method to determine the soil moisture content and dry density, which uses the oven drying combined with the cutting-ring, has the problems of long testing period and sampling disturbance, thus a rapid non-destructive testing method was proposed based on the frequency domain reflectometry (FDR) technology in this study. Firstly, based on the relationships of dielectric constant and bulk electrical conductivity with the soil moisture content and dry density, and by using the fitting relationship of dielectric constant and bulk electrical conductivity, the solving equations for soil moisture content and dry density were derived. After that, both the calibration test and model test that simulated the layered filling construction were conducted to verify the applicability of the proposed method. It is found that the proposed mothed to detect the soil moisture content and dry density is feasible with high accuracy.

Key words: frequency domain reflectometry; dielectric constant; soil moisture content; dry density; compaction quality

土料在水利、交通、市政等基础设施建设领域应用十分广泛,如在水利工程中常作为土坝、心墙、堤防等挡水结构物的填筑材料^[1-2]。质量含水率是土料填筑质量控制以及评价的重要参数,如在填方工程中,需控制土体质量含水率接近最优含水率以保证土体压实质量;在土体压实质量检测时,同样需测得土体质量含水率,再结合环刀法求得干密度,进而评价压实效果^[3]。近年来,随着填方作业机械化、智能化快速施工技术的发展^[4-5],开发土体质量含水率的快速测定技术对土方压实质量控制及评价具有重要的工程价值。

烘干法是工程中最常见的质量含水率测定方法,该法耗时长,难以满足碾压前土料含水率快速调整以及碾压后压实质量快速评估的要求,尤其在当前快速机械化施工条件下,不仅会增加施工机械闲置成本,还会影响工程施工进度。干密度测试方面,目前主要有环刀法、灌砂法及灌水法,但这些方法费时费力,对试样扰动较大,影响测试精度。介电法具有检测速度快、精度高的优点,主要包括时域反射法(time domain reflectometry, TDR)和频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)。TDR 法是根据高频电磁波通过导

基金项目:国家重点研发计划(2022YFE0105000);国家自然科学基金(U1765205,51979091,52009036);中央高校基本科研业务费专项(B210204021)

作者简介:周建平(1975—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程施工技术与管理研究。E-mail:565510595@qq.com

通信作者:王柳江(1985—),男,副教授,博士,主要从事特高心墙坝筑材料特性及计算理论研究。E-mail:15850514642@163.com

引用本文:周建平,李银,臧耀辉,等.基于 FDR 技术的土体质量含水率和干密度快速检测方法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):123-129.

ZHOU Jianping, LI Yin, ZANG Yaohui, et al. A method for quick detection of soil moisture content and dry density rapidly based on frequency domain reflectometry technology[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 123-129.

波探头的传输时间来确定土壤介电常数,进而测定出土体中水分含量的一种方法^[6]。利用 TDR 法测定土体质量含水率和干密度方面,Siddiqui 等^[7]通过总结大量试验结果,提出了基于 TDR 法的含水率及干密度计算公式,随后 Yu 等^[8]对该公式进行了温度补偿修正。陈赞等^[9]分析了 TDR 传感器类型、材料及尺寸对测试精度的影响,设计了一种整体性强、性能可靠、价格低廉的传感器,并将其用于土体质量含水率和干密度的测定。尽管 TDR 法具有诸多优点,但该方法采用的高速延迟线量测技术主要依靠进口,传感器价格昂贵,限制了其在工程中的应用。

近年来,FDR 法得到了快速发展,其测量原理与 TDR 法类似,是根据土壤中电磁波的传播频率来确定土壤介电常数^[10-11],进而测定出土体中水分含量。与 TDR 法相比,FDR 法测量快速安全、误差较低、测量范围广,且工作频率比 TDR 法低,既可定点连续测量,也可纵向多点同时测量,同时价格适中^[12]。此外,FDR 法在测得体积含水率的同时,还可同步测得土壤电导率^[13]。工程应用方面,董翰川等^[14]将其用于滑坡土体的体积含水率长期监测,通过室内标定和现场标定相结合的方式进行模型校准,以提高 FDR 法的测量精度;杨军平等^[15]研究了 FDR 法的参数率定方法,并将其用于膨胀围岩隧道模型体积含水率测定;冷伍明等^[16]将其用于路基土体含水率测量,并研究了干密度和温度对测量结果的影响;Martínez-Gimeno 等^[17]采用 FDR 法测量农田土壤含水率,以计算灌溉用水量;周策等^[18]研究了 FDR 法在滑坡体岩土层温度、含水量监测中的适用性。然而,上述利用 FDR 法测得的含水率均为体积含水率,与填方工程上常用的质量含水率不同。

本文基于 FDR 技术,提出一种土体质量含水率和干密度的快速测定方法,并通过模型试验对该方法的合理性及可行性进行验证。

1 测定原理

1.1 FDR 法测定原理

FDR 法的土壤水分测定传感器是一种基于 LC 电路的电磁振荡,根据电磁波振荡频率在不同介质中的变化来测定介质介电常数,通过一定的对应关系反演出土体体积含水率的仪器。该传感器采用串联 LC 谐振电路,等效电路如图 1 所示(图中 L 为电感, C 为电容, U_0 为电源电压, U_s 为电容电压)。

根据电路原理,当谐振发生的条件成立时,谐振频率 F 为

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(1)

谐振频率主要受到电感与电容变化的影响,由于土壤水分测定传感器的电感值是固定的,因此 F 只取决于电容的变化,而电容受土体介电常数的影响。当土体介电特性发生改变时,LC 振荡电路中电容就发生变化,谐振频率也相应改变。因而,通过传感器测得 F 后,即可根据式(1)求得电容 C 。设空气介质的电容为 C_0 ,则土体介电常数 ε 为

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}$$

(2)

由于介电常数主要与孔隙水含量有关,则根据介电常数可间接确定土体体积含水率。

1.2 质量含水率与干密度联合测定原理

Herkelrath 等^[19]对不同类型土体的介电常数进行了测试,发现体积含水率与介电常数的平方根呈线性关系,并提出了式(3)的通用关系式。

$$\theta = \bar{b} \sqrt{\varepsilon} + \bar{a}$$

(3)

式中: θ 为体积含水率; $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 为拟合参数。

$\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 与土体干密度 ρ_d 有一定相关性,为此 Malicki 等^[20]提出了考虑干密度影响的体积含水率关系式:

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0.819 - 0.618\rho_d + 0.159\rho_d^2}{7.17 + 1.18\rho_d}$$

(4)

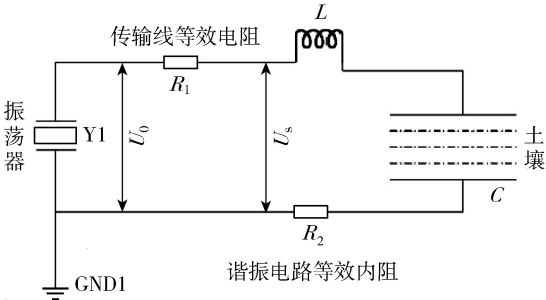


图 1 频域反射技术原理

Fig.1 Technology principle of FDR

尽管式(4)能够考虑干密度的影响,但形式较为复杂,工程适用性相对较差。在此基础上,Siddiqui 等^[7]建立了土体介电常数与质量含水率和干密度的关系:

$$\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d) = a + bw \tag{5}$$

式中: w 为土体质量含水率; ρ_w 为水的密度; a 、 b 为拟合参数。

根据质量含水率与体积含水率间的关系式可得:

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{b} - \frac{a}{b} \frac{\rho_d}{\rho_w} \tag{6}$$

可以发现,式(6)与通用关系式(3)的形式相同,但能够考虑干密度的影响,拟合精度更高。为验证式(5)的合理性,本文采用杨军平等^[15]针对不同干密度和含水率膨胀土重塑样介电常数的测试结果进行拟合分析,得到 $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 的关系,如图 2 所示。 $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 间呈很好的线性关系,拟合参数 $a=1.6423$ 、 $b=0.0411$,相关性 R^2 达到 0.9954,说明采用式(5)拟合介电常数与干密度和质量含水率的关系是可行的。

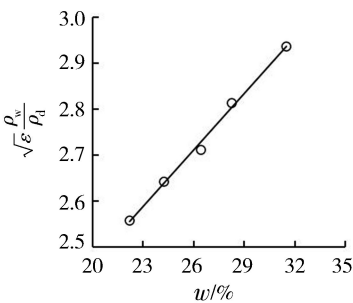


图 2 $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 的拟合关系曲线
Fig.2 Fitting curve of $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ and w

电导率是用于描述物质中电荷流动难易程度的参数,Rhodes 等^[21]通过对原状细粒土的电导率测试,发现土体电导率 σ 是体积含水率的函数:

$$\sigma = \sigma_w(\bar{c}\theta^2 + \bar{d}\theta) + \sigma_s \tag{7}$$

式中: σ_w 为孔隙水的电导率; σ_s 为土颗粒表面电导率; $\bar{c}$ 、 $\bar{d}$ 为拟合参数。

与介电常数相似,土体电导率除了与体积含水率相关外,还与土体干密度有关,干密度越大,土颗粒表面电导率越大。考虑到土体电导率主要取决于孔隙水的电导率,Yu 等^[8]提出了土体电导率与质量含水率和干密度的关系式:

$$\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d) = c + dw \tag{8}$$

式中 c 、 d 为拟合参数。

当测得土体介电常数及电导率后,联立式(5)(8)可得到土体质量含水率及干密度的求解公式:

$$w = \frac{c\sqrt{\varepsilon} - a\sqrt{\sigma}}{b\sqrt{\sigma} - d\sqrt{\varepsilon}} \tag{9}$$

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{\varepsilon} - b\sqrt{\sigma}}{ad - cb} \rho_w \tag{10}$$

需要注意的是,土体孔隙水的离子浓度对电导率影响显著,通常室内率定试验配制试样所采用水的电导率与现场土体孔隙水电导率不同,即拟合参数 c 和 d 无法反映现场土体,因此,直接利用式(9)(10)计算现场土体的质量含水率和干密度会出现失真,需要将式(9)(10)中的实测土体电导率进行修正,使其映射到率定试验条件下的土体电导率,进而消除现场土体孔隙水电导率与率定试验中孔隙水电导率不同引起的偏差。研究^[8]发现土体孔隙水电导率小于 0.15 S/m 时,其对介电常数的影响可忽略。在此基础上,提出了现场土体电导率的计算方法,即假设室内率定试验中的土体与现场土体的电导率与介电常数满足相同函数关系:

$$\sqrt{\sigma} = f(\sqrt{\varepsilon}) \tag{11}$$

因此,将现场测得的土体介电常数代入式(11)即可得到对应于室内率定试验条件的土体电导率,将式(11)代入式(9)(10),即可得到现场土体的质量含水率和干密度:

$$w = \frac{c\sqrt{\varepsilon} - af(\sqrt{\varepsilon})}{bf(\sqrt{\varepsilon}) - d\sqrt{\varepsilon}} \tag{12}$$

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{\varepsilon} - bf(\sqrt{\varepsilon})}{ad - cb} \rho_w \tag{13}$$

1.3 快速测定流程及适用范围

目前,TDR 法可以通过一次测试同时得到土体的质量含水率和干密度,并写入美国材料与试验协会

(ASTM)标准,其测试效率远远高于传统测试方法^[8-9]。本文主要研究利用 FDR 法替代 TDR 法测定土体介电常数的可行性,其测试流程与 TDR 法相同,操作流程如下:①将 FDR 传感器的探针垂直插入待测土体中;②启动信号采集仪,获得土体介电常数;③将介电常数代入式(12)(13),计算得到土体质量含水量和干密度,整个过程快速、简洁。需要说明的是,当土体干密度在 1.0~1.78 g/cm³时,FDR 法测定的土体介电常数精度高、可重复性好,但该法适用范围仅局限于测试场地土体较为均匀的情况,对于测试场地中含多种不同类型土体且空间分布变异性大的情况,目前尚无法实施^[22]。

2 参数率定试验

2.1 试样制备

试验采用粉质黏土,塑限为 20.8%,液限为 42.1%,最大干密度为 1.67 g/cm³,最优含水率为 20%,击实试验曲线如图 3 所示。基于击实试验结果,率定试验根据不同压实度和质量含水率共制备了 21 个试样,控制土样压实度为 0.8、0.9 和 1.0,质量含水率为 8%、11%、14%、17%、20%、23%和 26%。由于 FDR 传感器的测量区域为以中央探针为中心,直径 7 cm、高 7 cm 的圆柱体,为降低试样尺寸的影响,采用尺寸 Φ100 mm×150 mm 圆柱形试样。本次试样采用有机玻璃桶分层击实制备而成,且成形后试样均不脱模,这是为了防止 FDR 传感器探针插入时引起试样开裂,影响介电常数和电导率的测试结果^[12],同时有机玻璃为绝缘体,对土体介电常数量测精度的影响可以忽略。

2.2 率定方法

试验采用精讯畅通 FDR 土壤水分传感器,该传感器由主体和 3 根探针组成,探针长度为 70 mm,直径为 3 mm,可同时测得土体介电常数和电导率。试验过程中,首先将传感器探针插入每个试样采集介电常数和电导率,此步骤中改变探针插入位置重复 3~5 次测量,取平均值;其次,沿试样高度方向取 3 个不同部位的土样,采用烘干法测量质量含水率,取平均值;最后,根据试样密度,结合烘干法测得土体实际质量含水率和干密度。

2.3 参数率定结果

当配制的土体含水率较低或者较高时,制备的试样密实度和均匀性较差,对 FDR 法测试结果影响较大,剔除这些不合格的试样后,本次试验用于参数标定的试样共 15 个。表 1 为采用烘干法与 FDR 法测得的结果。将表中的测试结果按照式(5)(8)进行整理,分别以 $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 和 $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 作为纵坐标, w 为横坐标作图并进行拟合,拟合直线的斜率和截距就是对应的标定参数,如图 4 所示。由图 4 可知, $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 的线性关系较好,拟合相关性 R^2 达到 0.912,对应参数 $a=0.2686$ 、 $b=0.1223$;然而, $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 的线性关系相对较差,相关性 R^2 仅为 0.6075,拟合得到的参数 $c=0.1201$ 、 $d=0.0018$ 。 $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 随 w 的增长速率逐渐变小,即 w 越高,电导率随 w 的增长速率越慢,说明在较大的 w 变化区间内,采用线性关系拟合 $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 具有一定局限性。

根据 Rhodes 等^[21]提出的电导率随体积含水率变化关系式,土体含水率越高,电导率的增长速率越慢。由式(5)可知,介电常数主要取决于土体质量含水率,干密度一定时,介电常数与土体质量含水率呈线性正相关。因此,土体电导率随着介电常数的增大而增大,

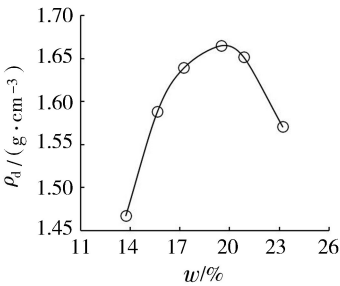


图3 击实曲线
Fig.3 Compaction curve

表1 烘干法与 FDR 法实测结果
Table 1 Measurement results of oven drying method and FDR

试样 编号	烘干法		FDR 法	
	$w_{烘}/\%$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	ε	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$
1	8.579	1.294	3.799	0.0233
2	11.640	1.320	5.386	0.0369
3	14.789	1.318	6.378	0.0439
4	11.735	1.494	6.423	0.0438
5	18.333	1.347	7.644	0.0438
6	17.066	1.328	8.113	0.0461
7	13.065	1.505	8.399	0.0508
8	22.404	1.334	14.012	0.0586
9	18.565	1.513	14.012	0.0582
10	17.845	1.647	16.474	0.0609
11	21.549	1.513	20.375	0.0603
12	18.435	1.680	22.090	0.0623
13	21.770	1.622	25.057	0.0619
14	26.787	1.487	27.674	0.0606
15	25.075	1.541	30.767	0.0620

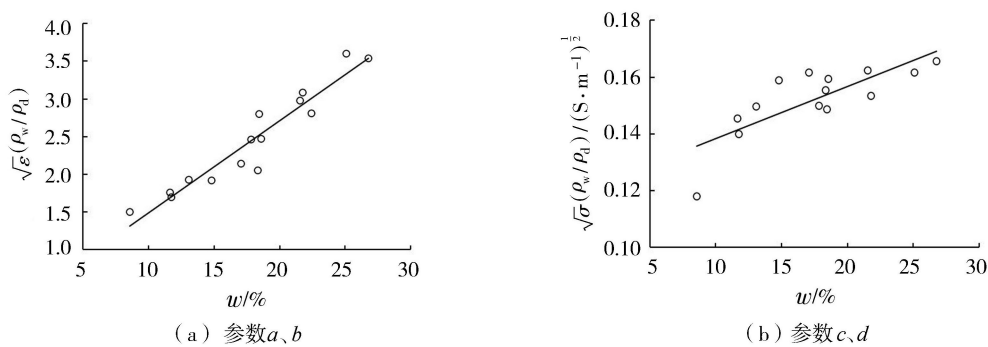


图 4 参数标定

Fig. 4 Calibration of parameters

但其增长速率随着介电常数的增大而减小,当 $\sqrt{\epsilon}$ 大于 3.5 后, $\sqrt{\sigma}$ 的增长速率趋于 0,本文采用一元三次方程对其进行拟合:

$$\sqrt{\sigma} = e_1 (\sqrt{\epsilon})^3 + e_2 (\sqrt{\epsilon})^2 + e_3 (\sqrt{\epsilon}) + e_4 \tag{14}$$

式中 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 为拟合参数。

针对本次试验所采用的土体,得到拟合参数如下: $e_1=0.0046$, $e_2=-0.0647$, $e_3=2.9999$, $e_4=-0.2163$,相关性 $R^2=0.9751$ 。需要说明的是,根据本文率定试验结果提出的 $\sqrt{\sigma}-\sqrt{\epsilon}$ 一元三次拟合关系式是否适用于所有类型土体尚需进一步验证。

3 试验验证

3.1 模型试验

为验证本文提出质量含水率与干密度快速测定方法的合理性,开展模型试验(图 5)模拟土体分层填筑,并对比 FDR 法与环刀法结合烘干法的测试结果。模型试验采用的模型箱尺寸为 80 cm×40 cm×60 cm (长×宽×高),采用的土料与率定试验相同,每层填筑结束后,利用 FDR 传感器对土体介电常数进行测试。

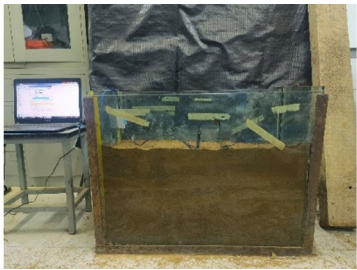


图 5 模型试验

Fig. 5 Model test

具体试验步骤如下:①在模型箱内分 5 层填入土体,每层厚度约为 10 cm,保持同一层土体的质量含水率和压实度接近,而上下层间的土体质量含水率和压实度不同;②每层土体填筑压实后对其表面进行整平,选不同部位的 6 个测点进行介电常数测试,在同一测点重复测 3~5 次,取平均值;③将率定参数和实测介电常数代入式(12)(13)(14)计算质量含水率和干密度;④在 FDR 传感器探针插入部位进行环刀取样,结合环刀法和烘干法测得土体实际质量含水率和干密度;⑤将本文方法计算得到的质量含水率和干密度与环刀法结合烘干法测得的质量含水率与干密度进行对比。

3.2 测试结果分析与讨论

由图 6(a)可知,质量含水率测点基本位于斜率 1:1 的 $\pm 3\%$ 绝对误差包线以内,说明得到的率定参数在模型试验中应用时没有产生较大误差,即本文提出的质量含水率快速测定方法可行。图 6(a)中大部分测点落在 $y=x$ 与 $y=x-0.03$ 的区间内,说明利用本文方法测得的质量含水率较实测值整体偏小,大部分测点位于 $y=x-0.015$ 直线附近,在实际工程应用时,可进一步对式(12)修正以提高本文方法的预测精度。由图 6(b)可以看到,当土体干密度介于 1.3~1.6 g/cm³ 时,本文方法测得的干密度与环刀法结合烘干法所测得的结果十分接近,干密度测点基本位于 ± 0.15 g/cm³绝对误差包线以内,说明采用本文方法测定干密度可行。

尽管利用本文方法测得的质量含水率和干密度与利用环刀法和烘干法测值的对应关系较好,但在局部精度上仍有待提高,如当土体实际质量含水率为 20% 时,采用本文方法测定的土体质量含水率变化区间为 17%~21.5%,存在较大离散现象;当土体实际干密度在 1.55~1.65 g/cm³ 时,采用本文方法测定的干密度在 1.58 g/cm³ 左右。通过对试验过程进行分析,认为后续研究中应对以下方面进行改进:①本次试验采用的

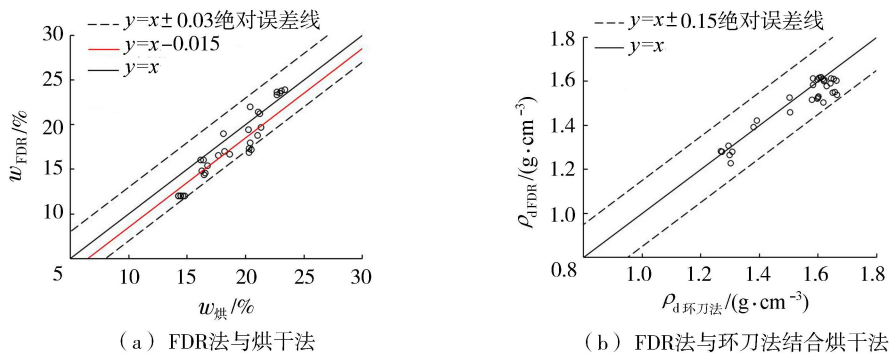


图 6 不同方法测定 w 和 ρ_d 结果对比

Fig.6 Result comparison of soil moisture content and dry density detected from different methods

FDR 传感器精度较低,同一试样介电常数和电导率的多次测试结果均有波动,应采用精度更高的传感器,以提高数据采集的稳定性;②率定试验采用了多个不同试样,考虑到不同试样间存在一定差异,可能对参数率定结果有影响,可采用单个试样的湿化和干化试验进行参数率定;③质量含水率变化区间较大时, $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 与质量含水率间的线性关系较差,可根据质量含水率的变化区间进行分段线性拟合;④率定试验中的土样采用分层击实制备而成,其质量含水率和压实度在高度方向存在一定不均匀性,对参数标定结果有所影响,建议采用压制成形的制备方法以提高试样均匀性;⑤模型试验中环刀取样部位与传感器插入位置相邻,受模型箱尺寸所限,同一土层相邻位置的土体含水率和干密度出现差异的概率增大,取样代表性减弱,后续应通过现场试验对本文提出方法进行验证和修正;⑥进一步考虑温度、含盐量等外部环境因素影响。

4 结 语

- a. 土体介电常数与电导率均与质量含水率和干密度相关, $\sqrt{\varepsilon}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 之间满足较好的线性关系,但 $\sqrt{\sigma}(\rho_w/\rho_d)$ 与 w 之间的线性关系相对较差,建议后续采用分段线性进行拟合,以提高拟合效果。
- b. 土体电导率随着介电常数的增大而增大,但增长速率逐渐减小,采用一元三次多项式拟合 $\sqrt{\sigma}$ 与 $\sqrt{\varepsilon}$ 的关系,可达到较好的拟合效果。
- c. 本文方法可同时测定土体质量含水率和干密度,且精度较高,有望在工程中应用,但需要提高 FDR 传感器对土体介电常数和电导率的量测精度、修正土体电导率与质量含水率和干密度的关系以及改进参数率定方法。

本文方法尚在初步探索阶段,后续将对其适用条件和范围开展深入研究,同时考虑温度、含盐量等外部因素的影响。

参考文献:

[1] 屈嘉程,田正宏,孙啸,等. 基于瑞雷波速的碾压混凝土压实效果评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):58-64. (QU Jiacheng, TIAN Zhenghong, SUN Xiao, et al. Evaluation of compaction effect of RCC based on Rayleigh wave velocity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):58-64. (in Chinese))

[2] 王柳江,赵志杰,刘斯宏,等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):358-365. (WANG Liujiang,ZHAO Zhijie,LIU Sihong,et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped-Storage Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):358-365. (in Chinese))

[3] 袁俊平,詹斌,陈胜超,等. 含水率和压实度对路基填土力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(2):98-102. (YUAN Junping, ZHAN Bin, CHEN Shengchao, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of roadbed[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2013,11(2):98-102. (in Chinese))

[4] 杨鹏,刘东海,刘强,等. 高填方推土机铺筑推平作业远程实时协同监控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):559-566. (YANG Peng,LIU Donghai,LIU Qiang,et al. Real-time and collaborative monitoring of bulldozer paving and leveling for high filled embankment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):559-566. (in Chinese))

[5] 刘东海,吴优. 基于 t 分布烟花算法的土石坝碾压参数多目标优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):243-

250. (LIU Donghai, WU You. Multi-objective optimization of earth-rock dam compaction parameters based on the t distribution mutation-firework algorithm[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 243-250. (in Chinese))
- [6] TOPP G C, YANUKA M, ZEBCHUK W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resources Research, 1988, 24(7): 945-952.
- [7] SIDDIQUI S I, DRNEVICH V P. A new method of measuring density and moisture content of soil using the technique of time domain reflectometry[R]. West Lafayette: Purdue University, 1995.
- [8] YU X, DRNEVICH V P. Soil water content and dry density by time domain reflectometry[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 922-934.
- [9] 陈赞, 陈伟, 陈仁朋, 等. TDR 联合监测土体含水量和干密度的传感器的设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 418-426. (CHEN Yun, CHEN Wei, CHEN Renpeng, et al. Design of TDR sensor for joint measurement of soil water content and dry density and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 418-426. (in Chinese))
- [10] BILSKIE J. Using dielectric properties to measure soil water content[J]. Sensors Magazine, 1997, 14: 26-32.
- [11] CAMPBELL G S, ANDERSON R Y. Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998, 20: 31-44.
- [12] 江朝晖, 檀春节, 支孝勤, 等. 基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪研制[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 79-82. (JIANG Zhaohui, TAN Chunjie, ZHI Xiaoqin, et al. Development of portable soil moisture detector based on principle of frequency domain reflectometry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(1): 79-82. (in Chinese))
- [13] HILHORST M A, VAN BREUGEL K, PLUIMGRAAFF D J M, et al. Dielectric sensors used in environmental and construction engineering[C]//GERHARDT R A, TAYLOR S R, GARBOCZI E J. Materials Research Society Symposium Proceeding. Boston: Mat. Res. Soc., 1996(411): 401-406.
- [14] 董翰川, 庞丽丽, 史云. 频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 55-61. (DONG Hanchuan, PANG Lili, SHI Yun. An experimental study of calibration of soil moisture content by using the frequency domain reflectometry[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 55-61. (in Chinese))
- [15] 杨军平, 王沾义, 周立新, 等. FDR 技术在膨胀围岩隧道模型含水率测定中的应用[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(30): 191-197. (YANG Junping, WANG Zhanyi, ZHOU Lixin, et al. Application of FDR technology in the determination of moisture content of swelling wall rock tunnel model[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(30): 191-197. (in Chinese))
- [16] 冷伍明, 涂仁盼, 聂如松, 等. 路基土水分传感器室内标定方法与影响因素分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(3): 231-239. (LENG Wuming, TU Renpan, NIE Rusong, et al. Method and effect analysis of laboratory calibration test on subgrade soil moisture sensor[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(3): 231-239. (in Chinese))
- [17] MARTÍNEZ-GIMENO M A, JIMÉNEZ-BELLOC M A, LIDÓN C A, et al. Mandarin irrigation scheduling by means of frequency domain reflectometry soil moisture monitoring[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106151.
- [18] 周策, 罗光强, 吴陶. FDR 型岩土多层含水量监测仪的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6): 60-66. (ZHOU Ce, LOU Guangqiang, WU Tao. Research on TDR-type multilayer water content monitor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 60-66. (in Chinese))
- [19] HERKELRATH W N, HAMBURG S P, MURTHY F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 857-864.
- [20] MALICKI M A, PLAGGE R, ROTH C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into consideration the solid soil[J]. Eur. J. Soil. Sci., 1996, 47(3): 357-366.
- [21] RHODES J D, RAATS P A C, PRATHER R J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on the bulk soil electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 651-656.
- [22] SKIERUCHA W, WILCZEK A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz frequency range[J]. Sensors, 2010, 10: 3314-3329.

(收稿日期: 2022-01-05 编辑: 刘晓艳)