

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220813003

文章编号:1672-9331(2023)01-0024-08

引用格式:许戈韦,顾凡,张军辉,等.粗粒土基质吸力与介电常数特征曲线研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):24-31.

Citation:XU Gewei, GU Fan, ZHANG Junhui, et al. Study on suction dielectric characteristic curve of coarse-grained soil[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci.), 2023, 20(1): 24-31.

粗粒土基质吸力与介电常数特征曲线研究

许戈韦, 顾凡, 张军辉, 张哲, 王绪丰

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】建立粗粒土介电常数与基质吸力的关系,进而根据介电常数确定粗粒土的含水率。【方法】首先,通过介电常数测试仪与滤纸试验得到不同粗粒土的介电常数与基质吸力,分析两者之间的关系,建立基质吸力-介电常数特征曲线(suction dielectric characteristic curve, SDCC)模型;然后,通过激光粒度分析仪确定各粗粒土的黏粒百分比 P ,结合滤纸试验测试结果和FREDLUND & XING模型得到各粗粒土的土水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC);最后利用黏粒百分比 P 预估粗粒土的SDCC的模型参数,建立粗粒土的SDCC与SWCC的关系。【结果】提出了粗粒土的SDCC力学经验模型,从而建立粗粒土介电常数与基质吸力的直接联系,通过拟合得到黏粒百分比 P 与SDCC模型参数的关系式,SWCC模型参数同样可由黏粒百分比 P 预估得到,最终建立起介电常数-基质吸力-含水率的相互依赖关系。【结论】粗粒土的基质吸力与介电常数之间存在联系,利用黏粒百分比 P 这一指标可以预估SDCC和SWCC的参数,通过测试粗粒土的黏粒百分比 P 与介电常数,可以确定粗粒土的基质吸力与含水率。

关键词:道路工程;粗粒土;介电常数;基质吸力;含水率;土水特征曲线

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

土体介电常数表征土体的介电性质,反映土体的含水率以及分子间的结合状态,压实度、含水率、温度、土体类型等均是影响土体介电常数的因素^[1]。在电磁学中,相对介电常数为材料介电常数与材料在真空中的介电常数的比值,实际问题中给定的介电常数一般为材料的相对介电常数,本研究将相对介电常数简称为介电常数。早在1964年苏联学者CHENYAK等^[2]就对土体介电特性进行了系统研究,随后国内外学者开展了大量工作并发展出多种测试方法,包括探地雷达法、时域反射法、时域传输法、矢量网络分析法等^[3-6]。现有研究一般通过确定土体的介电常数,然后基

于实测含水率值拟合建立含水率与介电常数之间的关系,从而通过测量介电常数确定含水率。然而在实际工程应用中发现,这种经验模型往往预测精度不足,计算得到的土体含水率与实际值差别较大,应用效果不理想。

土体吸力通常被定义为土体内部水分的自由能状态^[7],它将土的水分状况与土的工程特性建立了直接联系,土体总吸力由基质吸力与渗透吸力两部分组成。孔隙气压力减去孔隙水压力即为基质吸力^[8],土体中基质吸力的变化会引起含水率的变化,土体基质吸力与含水率之间的关系被定义为土水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)^[9],土水特征曲线是评价土体湿度敏感性的重要指标^[10],可以用来定量分析土体在外界条件影响下的持水能力,在非饱和土力学中发挥着

收稿日期:2022-08-13;修回日期:2022-09-09;接受日期:2022-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52108400);长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJXC202113)

通信作者:顾凡(1987—)(ORCID:0000-0002-3992-3545),男,教授,主要从事路基方面的研究。E-mail:fan.gu@csust.edu.cn

重要作用^[11]。

粗粒土是土石混合料的总称,分布广泛,具有较高的抗剪强度^[12]。本研究通过分析粗粒土介电常数与基质吸力的关系,提出基质吸力-介电常数特征曲线(suction dielectric characteristic curve, SDCC)这一概念,并建立相应的力学经验模型;根据土水特征曲线中基质吸力与含水率的关系,由介电常数即可确定粗粒土的含水率。基于本研究,通过现有土体介电常数测试技术,如探地雷达、Percometer等,即可快速准确地预测粗粒土含水率的实时分布情况。

1 试验方法

1.1 粗粒土介电常数测试

介电常数测试仪 Percometer 是一种测量材料介电常数 ϵ_r 、电导率和温度的仪器^[13],常用于环境土壤的研究中,为土壤含水率的测定以及探地雷达的使用提供必要的参数。

如图1所示,测试仪由一台主机和一个表面探头组成。Percometer是一种无损检测仪器,可以提供快速(15 s)且准确的读数,适用于室内试验与现场测试,测量频率为 50 kHz。Percometer用于现场测试时可通过内置的键盘进行控制,液晶显示屏上直接显示所有的相关信息;也可以通过调制解调器或者串行接口连接到电脑,运用配套软件控制仪器,所有相关信息均可通过电脑显示。



图1 介电常数测试仪

Fig. 1 Percometer

本研究所用粗粒土取自美国不同州与地区,共16种,记为S1~S16,对每种粗粒土各准备两个压实试样以测试介电常数 ϵ_r 。试样的制备对于获取一致的读数至关重要。试样高3.5 cm,直径7.6

cm,采用通过4.75 mm筛的土粒在最佳含水率下进行压实得到。将压实后的试样放入相对湿度为100%的室内,监测含水率变化情况。当试样的含水率下降到2%左右时,立即使用Percometer进行读数,如图2所示。上述操作在用滤纸试验确定基质吸力之前进行。



图2 压实土样的介电常数测试仪读数

Fig. 2 A percometer reads the dielectric constant of compacted soil samples

1.2 滤纸试验

滤纸试验是一种常用的测试土体基质吸力 h 的方法,同时也可以用来测试总吸力。在基质吸力测试中,将滤纸放置在两块试样之间,当试样达到平衡后,试样的吸力和滤纸中的吸力相等。试样制备如1.1节所述,使用Percometer完成介电常数的读数后,在两个试样之间放置三层滤纸,上下两层为保护滤纸,中间一层为测试滤纸,用以测定基质吸力。将试样用绝缘胶带密封后放入容器内,随后在试样顶部放置两张滤纸以测定总吸力并同样密封起来,如图3所示。试样在容器内放置7 d后取出,通过高精度天平测量不断增加的滤纸质量,最后,根据滤纸校准曲线确定试样的基质吸力^[14]。



图3 密封试样

Fig. 3 Sealing samples

通过对不同粗粒土进行滤纸试验和介电常数测试试验,根据测试结果建立了粗粒土基质吸力 h 与介电常数 ε_r 的对应关系。此关系给出了基质吸力随粗粒土介电常数变化的整个范围,将其定义为基质吸力-介电常数特征曲线(SDCC曲线),16种不同粗粒土S1~S16所对应的SDCC曲线如图4所示。

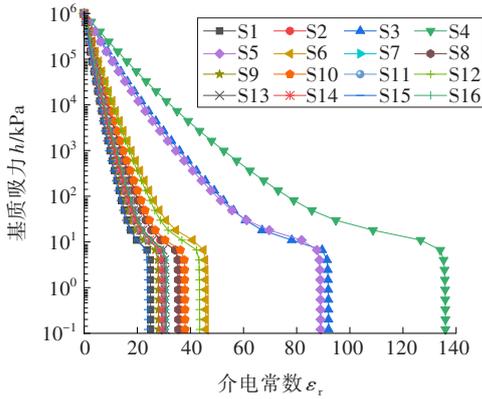


图4 各粗粒土的SDCC曲线

Fig. 4 SDCC curves of coarse-grained soil

1.3 黏粒百分比

土体中黏粒含量反映土体吸附能力,黏粒含量越高,土体颗粒比表面积越大,土体吸附性越强^[15]。HORIBA激光散射粒度分布分析仪是一种测定颗粒粒度分布的设备,如图5所示。设备由一个光学光源和一个大透镜组成,可测量小至0.02 μm的颗粒粒径,其工作原理为:用光束照射由颗粒和水组成的样品,利用光散射装置分析样品中各种颗粒的尺寸,最后通过仪器自带软件生成样品从最小到最大颗粒尺寸的粒度分布曲线。



图5 HORIBA激光散射粒度分布分析仪

Fig. 5 HORIBA laser scattering particle size distribution analyzer

定义黏粒百分比(percent fines content, PFC)为粒径小于0.002 mm的颗粒占粒径小于0.075 mm颗粒的质量百分比。对风干土样进行筛分,取小于0.075 mm的部分,利用HORIBA激光散射粒度分布分析仪对其进行测试,确定级配曲线。整个测试过程在10 min内完成,级配曲线可在1 min内生成。通过级配曲线确定粗粒土的黏粒百分比:

$$P = 100 \frac{m_{2\mu\text{m}}}{m_{75\mu\text{m}}} \quad (1)$$

式中: P 为黏粒百分比; $m_{2\mu\text{m}}$ 为粒径小于2 μm的颗粒质量百分率; $m_{75\mu\text{m}}$ 为粒径小于75 μm的颗粒质量百分率。

1.4 土水特征曲线

土水特征曲线表征了土体基质吸力 h 与含水率的关系。不同种类的土对应的土水特征曲线不同,本研究将不同粗粒土通过滤纸试验获得的测试数据用于建立对应的土水特征曲线SWCC。当前,主要有两种方式建立土水特征曲线SWCC:一种是通过滤纸试验或压力板试验测试不同含水率下基质吸力的试验方法;另一种则是以Van Genuchten模型^[16]、FREDLUND和XING模型^[9]为代表的预估方法,FREDLUND和XING模型的预估方法适用于全范围类的土种和全吸力范围内的土水特征曲线(SWCC曲线)预估,如式(2)~(3)所示。

$$\theta_w = C(h) \times \left\{ \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right] \right]^c} \right\} \quad (2)$$

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right] \quad (3)$$

式中: θ_w 为体积含水率; $C(h)$ 为校对方程; θ_s 为饱和体积含水率; h_r 、 a 、 b 、 c 为拟合参数。

通过多元回归分析确定方程中 h_r 、 a 、 b 、 c 四个参数以建立最佳拟合曲线。在开始多元回归分析前,需要获得三个点的数据。第一个点为基质吸力最大值处,一般认为当含水率为0.0时,基质吸力最大可达 10^6 kPa^[17]。第二个点为饱和体积含水率处,对应的基质吸力为0.0 kPa,计算公式如式(4)所

示。饱和体积含水率 θ_s 与土的孔隙率相关,定义土的孔隙率为饱和状态下的孔隙比。

$$\theta_s = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \quad (4)$$

式中: γ_d 为土的最大干密度; G_s 为土的比重; γ_w 为水的密度。第三个点为基质吸力与含水率实测点,可通过滤纸试验得到。已知这三个点后通过多元回归分析,以实测含水率与拟合含水率差值最小为目标确定四个拟合参数值得到最佳拟合曲线。相较于滤纸试验和压力板试验的耗时、耗料^[18-21],通过预估方法建立土水特征曲线的方法更为简单、高效。

图6为S8试样的土水特征曲线(SWCC曲线)。当含水率为4.3%时,测得该试样对应的基质吸力为7294 kPa,试样的最大体积含水率为14.36%。

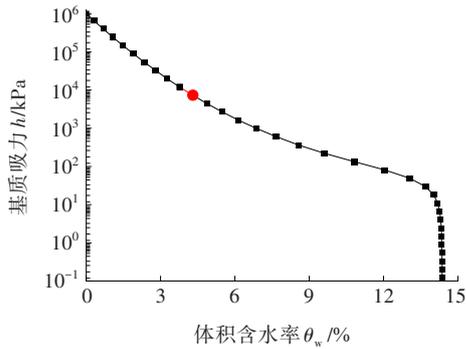


图6 试样S8的土水特征曲线

Fig. 6 SWCC curve for sample S8

2 土体基质吸力与介电常数特征曲线

2.1 复折射率方法

土体的介电常数(ϵ_r)由土体固相、气相、液相三相的介电常数组成,土体介电常数由各组分的体积百分率加权而得,如式(5)所示。

$$\epsilon_r^{(N)} = \sum_{i=1}^n \epsilon_{ii}^{(N)} c_i \quad (5)$$

式中: ϵ_{ii} 为第 i 个组分的介电常数; c_i 为第 i 个组分的体积百分率; n 为组分个数; N 为指数,介于 1/4 到 1 之间,一般取 $N=1/2$ 。

通过复折射率方法(complex refraction index model, CRIM)可确定粗粒土中固体的介电常数,复折射率方法介电常数方程如式(6)、式(7)所示。

$$\sqrt{\epsilon_r} = \left[\left(\sqrt{\epsilon_r^{sd}} - 1 \right) \theta^{sd} + \left(\sqrt{\epsilon_r^w} - 1 \right) \theta_w + 1 \right] \quad (6)$$

$$\sqrt{\epsilon_r^s} = \left[\left(\sqrt{\epsilon_r^{sd}} - 1 \right) \theta^{sd} + \left(\sqrt{\epsilon_r^w} - 1 \right) \theta_s + 1 \right] \quad (7)$$

式中: ϵ_r^{sd} 为固体的介电常数; θ^{sd} 为固体体积分率; ϵ_r^w 为水的介电常数,取 $\epsilon_r^w=81.0$; θ_w 为体积含水率; ϵ_r^s 为饱和介电常数; θ_s 为饱和体积含水率。

式(6)、式(7)推导出了土体介电常数在不同含水率下的变化情况及其边界范围,式(6)中土体介电常数可由介电常数测试仪测得,水的介电常数为81.0,固体的介电常数作为式(6)中唯一的未知参数可被求出。然后根据式(7),利用饱和体积含水率和固体体积分率可求得饱和介电常数,土体饱和介电常数是得到基质吸力介电常数特征曲线所需的参数。

2.2 SDCC模型及算法

基于JUAREZ-BADILLO^[22]的方法,提出了一个力学经验模型来表征SDCC曲线,通过土体的介电常数可以预估基质吸力。在定义的边界范围内,土体介电常数的变化与基质吸力的变化相关,土体介电常数越小,其基质吸力越大。图7阐释了SDCC模型的概念; ϵ_r^{\min} 为介电常数最小值; ϵ_r^{\max} 为介电常数最大值; h^{\max} 为基质吸力最大值(10^6 kPa)。图7中函数 $f_1(\epsilon_r)$ 定义了介电常数的变化边界,当 $\epsilon_r = \epsilon_r^{\max}$ 时, $f_1(\epsilon_r) = 0$; 当 $\epsilon_r = \epsilon_r^{\min}$ 时, $f_1(\epsilon_r) = \infty$ 。函数 $f_2(h)$ 定义了基质吸力的变化边界,当 $h = 0$ 时, $f_2(h) = 0$; 当 $h = h^{\max}$ 时, $f_2(h) = \infty$ 。通过归一化方法将介电常数与基质吸力参数转换到同一量化范围内。

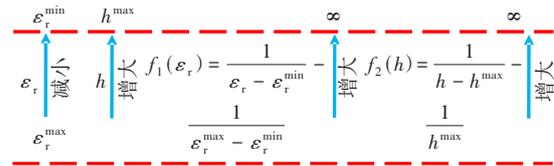


图7 SDCC模型的概念

Fig. 7 Concept of the SDCC model

SDCC模型的一般形式如式(8)、式(9)所示,包含与FREDLUND和XING提出的土水特征曲线预估方程中类似的四个拟合参数,并加入了一个新的参数 d_r 以修正饱和状态下的土体介电常数。

$$\epsilon_r = C(h) \times \left\{ \frac{d_r \epsilon_r^s}{\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a_r} \right)^{b_r} \right]^{c_r}} \right\} \quad (8)$$

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_f}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_f}\right)} \right] \quad (9)$$

式中: a_f 、 b_f 、 c_f 、 d_f 、 h_f 为拟合参数。

因此,与建立土水特征曲线的方法一样,通过基质吸力最大值、基质吸力与介电常数实测值、饱和介电常数值这三个点,进行多元回归分析确定五个拟合参数。饱和介电常数由式(6)、式(7)求得。图8为S8试样的SDCC曲线,反映了粗粒土基质吸力与介电常数之间的关系,测得的基质吸力与介电常数分别为7 294 kPa和8.19。

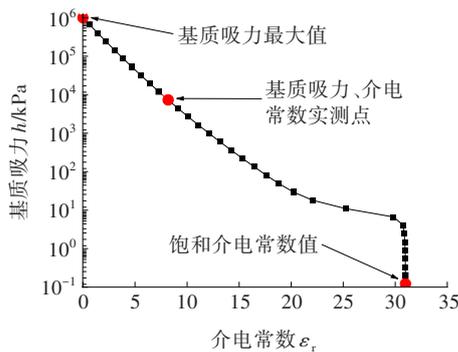


图8 试样S8的SDCC曲线

Fig. 8 SDCC curve for sample S8

3 PFC预估SDCC参数

通过室内试验确定介电常数与基质吸力的力学经验模型参数需要消耗大量时间和人力成本,粗粒土基质吸力主要受土体的细颗粒影响,而土体黏粒含量是土体细颗粒粒径分布的重要指标,因此用土体黏粒含量来预估介电常数与基质吸力的力学经验模型参数具有一定的工程合理性。对SDCC模型中的五个拟合参数与黏粒百分比 P 进行回归分析,得到各个拟合参数与黏粒百分比 P 的关系式,如式(10)~式(14)所示。各关系式的 R^2 均在0.75以上,大多数大于0.85,说明拟合效果良好。参数 a_f 、 c_f 、 h_f 、 d_f 与 P 成正比关系,随着 P 的增大而增大, b_f 随着 P 的增大而减小。图9~图13为各拟合参数真实值与预估值的比较。可以看出,预估值与真实值相差不大,说明建立的预

估方程较为合理,通过黏粒百分比 P 可以有效预估SDCC模型的参数。此外,土体黏粒含量参数可以简单快速测得,具有一定的工程推广和应用价值。

$$a_f = 4.3467e^{0.0353P}, R^2=0.92 \quad (10)$$

$$b_f = 11.379e^{-0.035P}, R^2=0.85 \quad (11)$$

$$c_f = 0.131e^{0.0188P}, R^2=0.89 \quad (12)$$

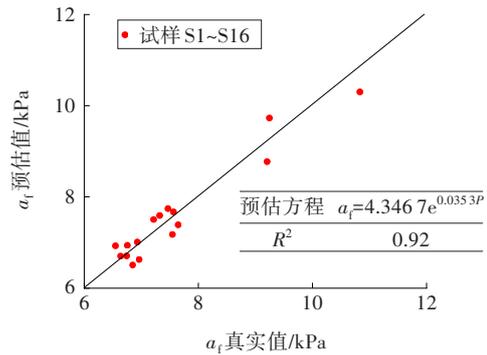


图9 a_f 真实值与预估值的比较

Fig. 9 Comparison between real and predicted a_f values

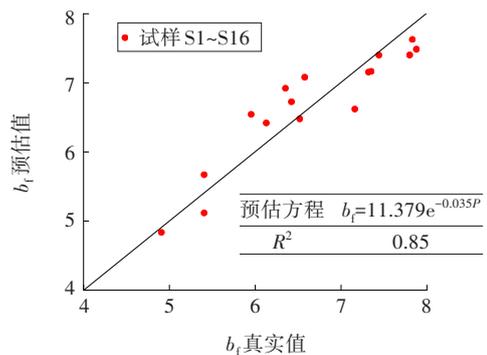


图10 b_f 真实值与预估值的比较

Fig. 10 Comparison between real and predicted b_f values

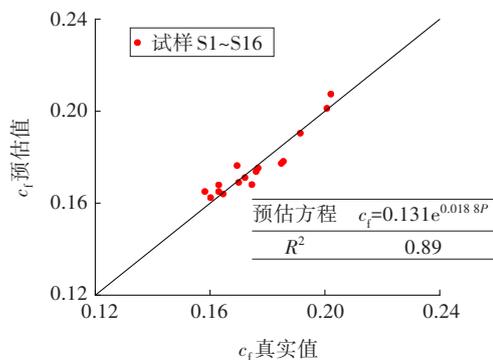


图11 c_f 真实值与预估值的比较

Fig. 11 Comparison between real and predicted c_f values

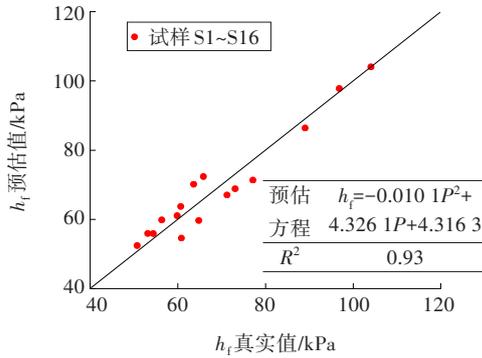


图12 h_t 真实值与预估值的比较

Fig. 12 Comparison between real and predicted h_t values

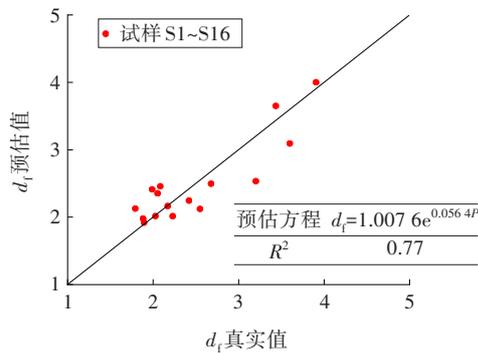


图13 d_t 真实值与预估值的比较

Fig. 13 Comparison between real and predicted d_t values

$$h_t = -0.010 1P^2 + 4.326 1P + 4.316 3, R^2=0.93 \tag{13}$$

$$d_t = 1.007 6e^{0.056 4P}, R^2=0.77 \tag{14}$$

4 SDCC与SWCC的关系

同预估SDCC模型参数的方法一样,SWCC方程中的四个拟合参数同样可由黏粒百分比 P 预估得到。因此,通过测试粗粒土的黏粒百分比 P 就可以得到对应的基质吸力介电常数特征曲线SDCC与土水特征曲线SWCC。图6、图8分别是试样S8对应的SWCC与SDCC,图8中实测的介电常数为8.19,基质吸力为7 294 kPa,而基质吸力为7 294 kPa时在图6中对应的含水率为4.3%。通过测试介电常数,可以由SDCC得到对应的基质吸力,已知基质吸力后又可以通过SWCC得到对应的含水率,从而建立了介电常数-基质吸力-含水率的相互依赖关系,如图14所示。

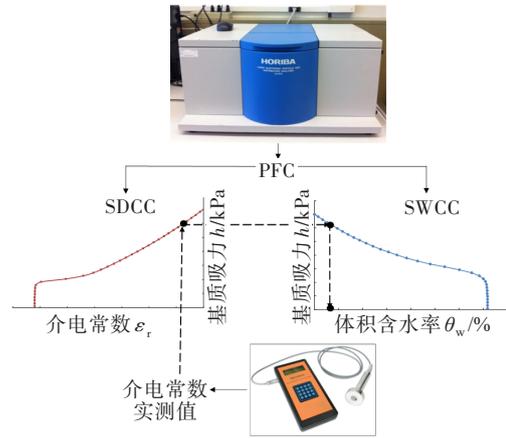


图14 预估含水率与基质吸力的过程

Fig. 14 Process of estimation of moisture content and matric suction

5 结论

本研究通过介电常数测试仪、滤纸试验以及激光粒度分析仪对不同粗粒土进行测试,获得粗粒土的介电常数、基质吸力和黏粒百分比,根据测试结果建立了粗粒土介电常数与基质吸力的力学经验模型,结合土水特征曲线模型,进而提出粗粒土含水率的快速测试方法。

[参考文献]

[1] 张越. 基于季冻区路基土介电特性量测含水率的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019. DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004644.
ZHANG Yue. Applied research on measuring water content of subgrade in seasonal frozen area based on dielectric properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004644.

[2] CHERNYAK G Y, KANER N. Dielectric methods for investigating moist soils[M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations,1967.

[3] 于晓贺,罗蓉,王锦腾,等. 相对湿度对沥青混合料介电特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021,49(1):106-109.DOI:10.13245/j.hust.210118.
YU Xiaohu, LUO Rong, WANG Jinteng, et al. Influence of relative humidity on the dielectric properties of asphalt mixture[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 106-109. DOI:10.13245/j.hust.210118.

[4] CALAMITA G, BROCCA L, PERRONE A, et al.

- Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454-455: 101-112. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.001.
- [5] SHIN D, GHO H, PARK W, et al. Extraction of propagation constant of XLPE cable using time-domain transmission[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(12): 2855-2862. DOI: 10.1109/TIM.2014.2324811.
- [6] 彭燕,陈岩,王克栋,等.基于网络分析仪的溶液介电常数测量方法[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(4): 29-31. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2016)04-0029-03.
PENG Yan, CHEN Yan, WANG Kedong, et al. Dielectric constant measurement method of solution based on network analyzer[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(4): 29-31. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2016)04-0029-03.
- [7] TAO G L, GU K, ZHONG C H, et al. The test and fitting analysis of Hunan clay soil-water characteristic curve in full suction range[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(23): 1-14. DOI: 10.1007/S12517-021-08618-7.
- [8] 黄晓明. *路基路面工程*[M]. 6版. 北京: 人民交通出版社, 2019.
HUANG Xiaoming. *Road subgrade and pavement engineering*[M]. 6th ed. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [9] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521-532. DOI: 10.1139/t94-061.
- [10] LV M F, LI Y H, GUO Y C. Water retention characteristics and soil-water characteristic curve model of weak expansive soil[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2021, 58(2): 123-129. DOI: 10.1007/s11204-021-09716-0.
- [11] 贺伟,陈永贵,王泓华.基于正态分布的土水特征曲线独立域滞后模型[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 6(2): 28-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2009.02.006.
HE Wei, CHEN Yonggui, WANG Honghua. Independent domain hysteretic model for SWCC by introducing normal distribution function[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2009, 6(2): 28-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2009.02.006.
- [12] 《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): 1-49. 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): 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- [13] YEO Y S, NIKRAZ H, JITSANGIAM P. Tube suction test to measure moisture susceptibility of Australian pavements[J]. *Engineering Journal*, 2012, 16(4): 159-168. DOI: 10.4186/ej.2012.16.4.159.
- [14] BULUT R, AUBENY C P, LYTTON R L. Unsaturated soil diffusivity measurements[C]//International Symposium on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Leiden: BALKEMA A A, 2005: 281-286.
- [15] 陶高梁,张季如,庄心善,等.描述黏粒含量对土-水特征曲线影响规律的分形模型[J]. *水利学报*, 2014, 45(4): 490-496. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.04.015.
TAO Gaoliang, ZHANG Jiru, ZHUANG Xinshan, et al. A fractal model describing the relation between clay content and soil-water characteristic curve[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(4): 490-496. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.04.015.
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- [17] ZAPATA C E. A national catalog of subgrade soil-water characteristic curve (SWCC) default inputs for use with the MEPDG[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2010.
- [18] 张锐,郑健龙.公路膨胀土路堤湿度平衡规律研究[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(11): 24-32. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.11.005.
ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Study on moisture equilibrium of highway expansive soil embankment[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(11): 24-32. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.11.005.
- [19] NG C W W, ZHOU C, YUAN Q, et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(2): 223-232. DOI: 10.1139/cgj-2012-0052.
- [20] 王桂尧,李斌,罗军,等.粉土基质吸力的新型量测装置与土-水特征研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3678-3682. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.11.039.
WANG Guiyao, LI Bin, LUO Jun, et al. Study of soil-water characteristics and matric suction measurement device for unsaturated silty soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3678-3682. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.11.039.
- [21] 张军辉,张银银,彭俊辉.快速测量重塑土土水特征曲线的试验方法研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(6): 255-259.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.054.
ZHANG Junhui, ZHANG Yinyin, PENG Junhui.
Research on the experimental method for quickly
measuring soil water characteristics curve of remolded
soil[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):

255-259. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.054.
[22] JUAREZ-BADILLO E.General compressibility equation
for soils[C]//Proceedings of the International Conference
in Soil Mechanics and Foundation Engineering.Leiden:
BALKEMA A A,1981:171-178.

Study on suction dielectric characteristic curve of coarse-grained soil

XU Gewei, GU Fan, ZHANG Junhui, ZHANG Zhe, WANG Xufeng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to establish the relationship between the dielectric constant of coarse-grained soil and matric suction, the water content of coarse-grained soil is then determined based on the dielectric constant. [Methods] Firstly, the dielectric constant and matric suction of different coarse-grained soils were obtained by dielectric constant tester and filter paper test. The relationship between them was analyzed, and the suction dielectric characteristic curve (SDCC) model was established. Then, the percent fines content (P) of each coarse-grained soil was determined by a laser particle size analyzer, and the soil water characteristic curve (SWCC) of each coarse-grained soil was obtained by combining the filter paper test results and the FREDLUND & XING's model. Finally, P was used to predict the model parameters of coarse-grained soil's SDCC, and the relationship between SDCC and SWCC was established. [Findings] The SDCC mechanical empirical model of coarse-grained soil is proposed to establish the direct relationship between the dielectric constant of coarse-grained soil and the matrix suction. The relationship between the P and the parameters of the SDCC model is obtained by fitting. The parameters of the SWCC model can also be estimated by the P . Finally, the interdependence of dielectric constant-matrix suction-water content is established. [Conclusions] There is a relationship between matric suction and dielectric constant of coarse-grained soil. The parameters of SDCC and SWCC can be estimated by using the P . The matric suction and water content of coarse-grained soil can be determined by testing P and dielectric constant of coarse-grained soil.

Key words: road engineering; coarse-grained soil; dielectric constant; matric suction; water content; soil water characteristic curve

Manuscript received: 2022-08-13; **revised:** 2022-09-09; **accepted:** 2022-09-14

Foundation item: Project(52108400) supported by the National Science Foundation of China; Project(SJCX202113) supported by Changsha University of Science & Technology Postgraduate Practical Innovation and Entrepreneurship Enhancement Program.

Corresponding author: GU Fan (1987—) (ORCID: 0000-0002-3992-3545), male, professor, research interest: subgrade engineering. E-mail: fan.gu@csust.edu.cn

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:田湘)