

DOI: 10.11779/CJGE201605007

改进一步法模型及 TDR 自适应方法研究

赵 云^{1, 2}, 凌道盛^{*1, 2}, 王云龙^{1, 2}, 黄 博^{1, 2}

(1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 建立土体含水率和干密度与电磁参数间的经验模型是 TDR 技术在岩土工程中应用的关键。在原一步法模型基础上, 分别建立了土体含水率、干密度与土体介电常数等电磁参数间新的经验关系模型, 实现了干密度和含水率的解耦计算。分析了击实功、孔隙水电导率、温度等因素对新经验公式的影响。通过标定后, 新经验公式计算的干密度相对偏差在 $\pm 5\%$ 以内, 含水率偏差在 $\pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以内。同时, 提出了一种 TDR 自适应方法, 可在现场无标定条件下实现土体干密度和含水率的快速高效测定。

关键词: 干密度; 含水率; 经验公式; TDR; 自适应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0818-10

作者简介: 赵 云(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学等方面的研究。E-mail: zhaoyun1106@163.com。

Modified one-step method and its adaptive system of TDR

ZHAO Yun^{1, 2}, LING Dao-sheng^{1, 2}, WANG Yun-long^{1, 2}, HUANG Bo^{1, 2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The key of using the technology of time domain reflectometry (TDR) is to establish the empirical equation for the relationship among electromagnetic parameters, water content and dry density. Based on the one-step method, two empirical equations are established for the content, dry density, apparent dielectric constant and drop volt parameter, which can calculate the water content and dry density respectively. Then the influence laws of compaction energy, pore fluid conductivity and temperature on the calculated results by the new equations are analyzed. After calibration, the relative error of dry density is within $\pm 5\%$, and the error of water content is within $\pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. Meanwhile, an adaptive method is proposed to test the water content and dry density by using the TDR method conveniently and efficiently in the field tests in which the calibration tests may not be conducted.

Key words: dry density; water content; empirical equation; TDR; adaptive system

0 引 言

含水率和干密度是评价路基、堤坝、边坡等土体工程性质的重要参数, 高效测试土体的含水率和干密度在岩土工程中具有重要意义。电磁波时域反射法(time domain reflectometry, TDR)利用水的介电常数远大于土固体颗粒和空气这一特点, 通过测试土体的电磁参数确定土体含水率和干密度, 具有快速、安全和可实现自动化连续监测等优点, 在农业、水利及环境土工等领域得到广泛应用^[1-6]。

建立土体含水率、干密度与介电常数等电磁参数间的关系模型是 TDR 测试技术的关键。Topp 等^[7]建立了一个体积含水率和表观介电常数间的经验关系模型, 极大地推动了这一研究进展。之后, 又出现了多种形式的经验公式, 包括体积含水率与介电常数平方根的

线性关系模型^[8-10]和考虑密度影响的经验模型^[11-12]。由于岩土工程中通常采用质量含水率来评价土体工程性质^[13], Siddiqui 等^[14]建立了关联土体质量含水率、干密度与介电常数的经验公式并提出了两步法实现原位土体质量含水率和干密度的联合测定。Yu 等^[15]在此基础上, 利用 TDR 测试波形反映出的土体电导率信息, 建立了土体电导率与质量含水率间的线性经验公式, 提出了只需一次原位 TDR 测试即可获得土体质量含水率和干密度的一步法。Abu-Hassanein 等^[16]、Zambrano^[17]的研究结果显示土体电导率和含水率之间并不是线性关系, 为此, Jung^[18]提出“电压降方法”, 建立了电

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047005)

收稿日期: 2015-04-14

*通讯作者

压降参数、介电常数与土体干密度间的经验公式, 用于取代一步法中电导率与含水率的经验公式, 实现一步测试土体的含水率和干密度, 也被称为一步法, 该方法已被写入美国材料与试验协会 ASTM D6780—12^[19]标准 (本文之后所提一步法均指由电压降方法建立的一步法)。

一般而言, 通过标定后, 利用一步法模型便可实现对土体含水率和干密度的高效测试, 然而由于以下原因, 使一步法模型在实际应用中仍存在一些限制:

①一步法模型中先求解干密度, 之后利用干密度求解得到含水率, 这样将会导致干密度的计算偏差累积到含水率, 影响含水率的计算精度。②一步法模型干密度公式中标定参数相对较多, 公式形式相对复杂, 不方便工程应用。③对不同土体, 一步法模型采用不同常量参数, 而现场土质不均匀, 土体类型不单一, 对每一种土进行常量参数标定是不太现实的。这极大地限制了 TDR 测试技术在实际岩土工程中的应用。

本文通过建立新的标定公式实现了干密度和含水率的解耦计算, 提出了一种 TDR 自适应方法, 为现场无法标定条件下 TDR 测试技术的运用提供了途径。

1 公式提出

1.1 一步法介绍

图 1 给出了土体 TDR 典型测试波形, 其中电压降 V_i 是指脉冲信号首次到达测试介质表面和探针末端反射点相对电压信号幅值之差。 l_a 为电磁波在土体表面和探针末端反射点之间的水平表观距离, 称为表观长度。 V_f 为远端稳定相对电压幅值。由 TDR 测试波形可以得到土体的表观介电常数 K_a :

$$K_a = \left(\frac{l_a}{l_b} \right)^2, \quad (1)$$

式中, l_b 为探针在测试土体中的长度。

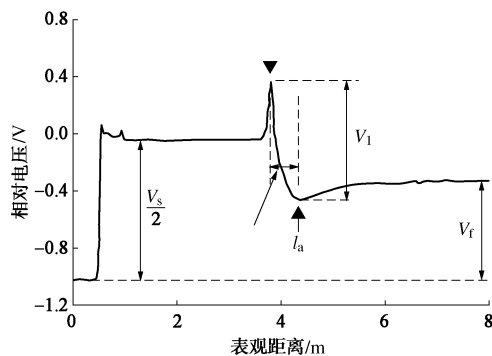


图 1 典型 TDR 波形 (引自 ASTM D6780—12^[19])

Fig. 1 Typical TDR waveform for soil (from ASTM D6780—12^[19])

Jung^[18]提出电压降方法实现了干密度和含水率的

联合测定, 所采用的经验公式为

$$\frac{V_i/V_f}{\rho_d} = c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)] \quad (2)$$

$$\frac{\sqrt{K_a}}{\rho_d} = a_1 + b_1 w \quad (3)$$

式中 ρ_d 为土体的干密度; w 为土体的质量含水率; a_1 , b_1 , c_1 , d_1 , f_1 为与土体类型有关的标定常数。

使用一步法时, 首先需要在室内按照 ASTM D6780—12^[19]推荐方法对式 (2)、(3) 中的常量参数进行标定, 在计算过程中, 首先由式 (2) 算出干密度, 之后, 将得到的干密度代入式 (3) 中获得土体含水率。

1.2 新经验公式

由一步法计算流程可以看出, 式 (2) 计算的干密度偏差将会累积到式 (3) 中, 从而对含水率的计算精度产生影响, 因此, 有必要直接建立含水率和介电常数、电压降参数的经验关系, 实现含水率和干密度的解耦计算。

将式 (2) 代入式 (3) 中, 得到

$$\frac{V_i}{V_f}(a_1 + b_1 w) = \sqrt{K_a} \cdot \{c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)]\} \quad (4)$$

式 (4) 中等式左边是电压降参数和含水率函数的乘积, 右边是关于介电常数的函数。图 2 给出了一些常见土体电压降参数和含水率乘积与介电常数 K_a 间的关系图, 可以看出, 两者间关系主要呈抛物线形式。考虑到: 当 $K_a = 1$ 时, 即在空气中进行 TDR 测试, $V_i = 0$ 。假设含水率和介电常数、电压降参数有如下经验关系:

$$\frac{V_i}{V_f} w = (K_a - 1)(a + b K_a) \quad (5)$$

式中, a , b 为与土类型有关的标定常数。

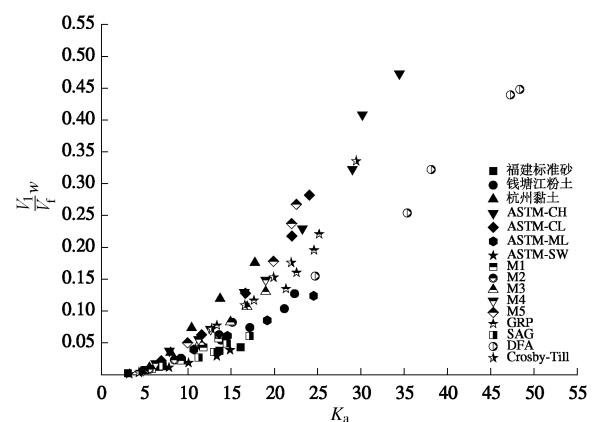


图 2 $V_i w / V_f$ 与 K_a 关系图

Fig. 2 Relationship between $V_i w / V_f$ and K_a

与之类似, 根据图 3 所示的一些常见土体电压降参数与干密度的比值与介电常数 K_a 间的关系, 假设干密度与介电常数、电压降参数有如下经验关系:

$$\frac{V_1/V_f}{\rho_d} = \frac{K_a - 1}{c + dK_a}, \tag{6}$$

式中， c ， d 为与土体类型有关的标定常数。

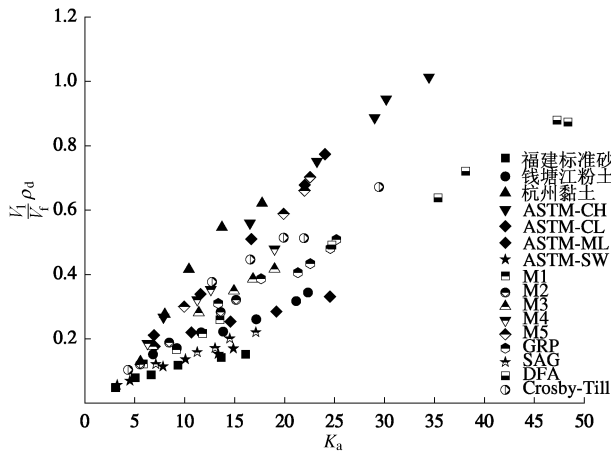


图3 $V_1/V_f/\rho_d$ 与 K_a 关系图

Fig. 3 Relationship between $V_1/V_f/\rho_d$ and K_a

2 室内试验与结果

2.1 试验方法与条件

为验证式 (5)、(6) 的有效性，针对 3 种典型土类福建标准砂、钱塘江粉土、杭州黏土进行 TDR 室内测试。其基本土工参数如表 1、2 和图 4 所示。

表 1 福建标准砂物理特性

Table 1 Physical properties of Fujian sand

土体类型	比重 G_s	孔隙比		干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
		e_{\max}	e_{\min}	
福建标准砂	2.64	0.834	0.556	1.51~1.58

表 2 室内试验粉土、黏土基本土工参数

Table 2 Physical properties of silt and clay soils

土体类型	比重 G_s	液限 /%	塑限 /%	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
钱塘江粉土	2.69	31.7	22.6	1.53~1.65
杭州黏土	2.66	48.0	32.6	1.32~1.57

TDR 测试系统包括 TDR 信号发生器、同轴测试筒及计算机等。TDR 信号发生器为美国 Campbell Scientific 公司生产的 TDR100 时域发射仪，结合其配属软件 PCTDR 和计算机完成信号的收发和处理工作。同轴转换器、探针定位模块、探针等采用 ASTM D6780—12^[19]推荐，同轴测试筒的高度为 11.6 cm。

试验在室温条件下进行，土样经过烘干和过筛 ($<0.5\text{ mm}$) 后，与一定量的水搅拌均匀后放入密封塑料袋中静置 24 h。之后按照 ASTM D698—12^[20]中标准击实方法将土样分层击入同轴测试筒，称重后进行 TDR 测试，最后，取筒内代表性土样若干，采用烘干

法获得试样实际质量含水率 w 。

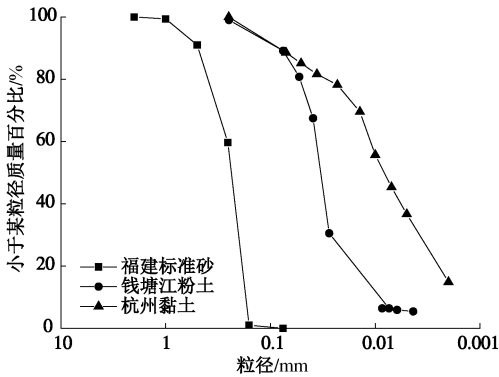


图 4 土体颗粒级配曲线

Fig. 4 Grading curves of soils

2.2 试验结果

表 3 给出了式 (2)、(3)、(5)、(6) 的各参数的标定结果。

由表 3 可以看出，式 (5)、(6) 与试验数据均具有较高的相关性 ($R^2 > 0.93$)，表明本文模型的有效性。图 5 给出了由原一步法公式和本文公式计算干密度、含水率与烘干法结果的比较。

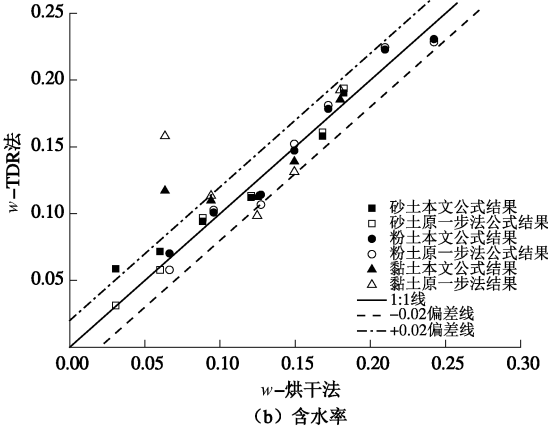
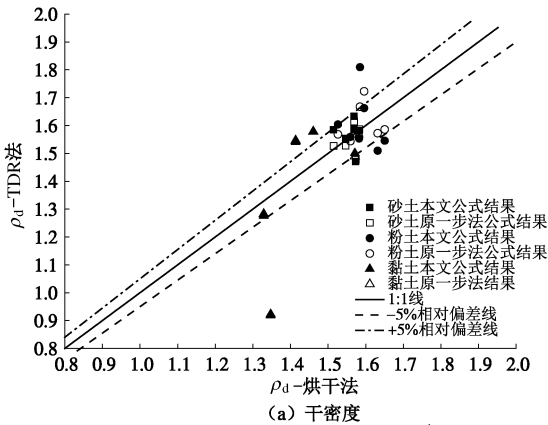


图 5 原一步法公式与本文公式土体 (a) 干密度、(b) 含水率计算结果与烘干法结果比较

Fig. 5 Comparisons of (a) dry density, (b) water content by TDR method and oven-dry method for origin one step method calibration equation with Eq. (5) and Eq. (6)

表 3 室内试验标定结果

Table 3 Calibrated results of parameters of one-step method and new empirical method

模型 标定 公式	原一步法							新经验公式					
	式 (2)				式 (3)			式 (6)			式 (5)		
	c_1	d_1	f_1	R^2	a_1	b_1	R^2	c	d	R^2	a	b	R^2
福建标准砂	0.0796	0.0050	0.3038	0.9893	0.8638	9.0997	0.9913	32.4323	4.1701	0.9917	1.84×10^{-3}	7.0146×10^{-5}	0.9836
钱塘江粉土	0.0731	0.0123	1	0.9702	1.0757	8.4797	0.9885	34.3741	1.3797	0.9464	1.68×10^{-3}	1.7896×10^{-4}	0.9865
黏土	0.0745	0.0356	0.1	0.9024	1.3141	7.8628	0.9638	23.1658	0.1444	0.9373	1.6×10^{-3}	5.1949×10^{-4}	0.9794

由图 5 看出, 采用式 (5)、(6) 计算的含水率偏差在 $\pm 0.02 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以内, 干密度相对偏差在 $\pm 5\%$ 以内, 表明本文公式对试验数据具有较好的拟合效果。值得指出的是, 黏土中有一个数据点干密度相对偏差较大, 从而导致式 (2) 的含水率偏差达到 $0.09 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 而采用式 (6) 计算, 则偏差值降至 $0.05 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 可见本文模型有效避免了干密度偏差累积对含水率计算结果的影响。

3 影响因素分析

土体的介电常数和电压降参数受击实功、孔隙水电导率、温度等因素的影响。为量化评价上述因素的影响, 本文采用如下统计量化评价指标:

绝对偏差 (Δw) 来反映含水率计算结果与烘干法结果的偏离程度:

$$\Delta w = w - w_0 \quad , \quad (7)$$

式中, w_0 为烘干法结果。

相对偏差 ($\Delta \rho_d$) 来反映干密度计算结果与烘干法结果的偏离程度:

$$\Delta \rho_d = (\rho_d - \rho_{d0}) / \rho_d \quad , \quad (8)$$

式中, ρ_{d0} 为采用烘干法和密度方法结合的干密度值。

平均偏差 (E) 来反映计算结果偏差的平均值:

$$E(\Delta i) = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta i|}{n} \quad , \quad (9)$$

式中, i 代表 w 或 ρ_d , n 为数据点的个数。

标准差 (SE) 反映平均偏差 E 的离散程度:

$$SE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta i - E)^2 / n} \quad . \quad (10)$$

均方偏差 (SEE) 反映偏差 Δw 和 $\Delta \rho_d$ 的离散程度:

$$SEE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta i)^2 / (n - 2)} \quad . \quad (11)$$

各影响因素分析过程中, 所采用的文献中土体基本土工参数和数据来源如表 4 所示。

3.1 击实功影响

对于质量含水率一定的土体, 在不同的击实功作用下, 试样处于不同的密度和结构状态, 从而影响测得的介电常数值和电压降参数值。通过室内标准击实方法得到的标定参数被用来计算现场处于未知击实功水平的土样, 因此击实功对计算结果的影响需要考虑。

Jung^[18]分别采用单位体积土体击实能量为 2700, 600, 360 $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 的改进击实方法 (modified compaction effort, ASTM D 1557—09^[21])、标准击实方法 (standard compaction effort, ASTM D 698—07^[22]) 和折减击实方法 (reduced compaction effort, ASTM D 698—07^[22]) 对 ASTM D 2487—10^[23]推荐的 4 种土进行了室内 TDR 试验, Lin^[24]用同样的击实方式对 M1~M5 土样进行了室内 TDR 试验。为方便起见, 图 6 仅给出了 ASTM-CH 土样在不同击实功作用下由式 (5)、(6) 计算的干密度值、含水率值与烘干法的对比结果。计算过程中, 标定参数仅由通过拟合标准击实试样结果获得。在 3 种击实方式下, 上述 9 种土样含水率、干密度的平均偏差、标准差、均方偏差以及偏差分布, 如表 5 所示。其中表中“ $\leq \pm 1\%$ ”行表示偏差范围在 $\pm 1\%$ 以内数据点个数占总数据点个数的百分比, 余同。

由图 6 和表 5 可以看出, 随着击实功的增加, 干密度和含水率计算结果的平均偏差和均方偏差均有增加趋势, 干密度偏差在 $\pm 5\%$ 以内和含水率偏差 $\pm 0.03 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以内数据比例也相应减少, 也即式 (5)、(6) 的偏差随着击实功的增加而加大。总体而言, 各统计指标及偏差水平平均处于一个较低水平, 在岩土工程中常见的击实功范围内, 击实功变化对计算结果影响不明显。

3.2 孔隙水电导率影响

在电磁波作用下, 土单元体中孔隙水的电导率不同, 引起的介电损失不同, 从而影响测得的介电常数和电压降参数值。Jung^[18]分别采用去离子水、自来水

表 4 文献中土体的物理参数与试验条件

Table 4 Properties of soils and test conditions from references

土体名称	土体类型	比重	液限 /%	塑限 /%	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%	击实方法	温度 /℃	孔隙水	数据个数	数据来源
ASTM-CH	CH	2.72	59.8	39.2	1.2	42.5	56.3	SC, MC,RC	20	TAP,DI,SAL	29	Jung ^[18]
ASTM-CL	CL	2.67	33.4	13.6	11.5	42.5	46.0	SC, MC,RC	20	TAP	15	Jung ^[18]
ASTM-ML	ML	2.73	27.4	4.1	1.0	94.0	5.0	SC, MC,RC	20	TAP	15	Jung ^[18]
ASTM-SP	SP	2.66	—	—	99.0	—	—	SC, MC,RC	20	TAP	19	Jung ^[18]
M1	SM-SC	2.76	—	—	55.0	35.0	10.0	SC, MC,RC	20	TAP	12	Jung ^[18]
M2	ML	2.77	16.2	5.7	37.5	45.0	17.5	SC, MC,RC	20	TAP	14	Jung ^[18]
M3	CL	2.83	28.5	16.2	20.0	55.0	25.0	SC, MC,RC	20	TAP	12	Jung ^[18]
M4	CL	2.83	33.7	14.8	12.5	47.5	40.0	SC, MC,RC	20	TAP	13	Jung ^[18]
M5	CL	2.82	41.0	21.1	5.0	40.0	55.0	SC, MC,RC	20	TAP	13	Jung ^[18]
GRP	CL	2.68	31.1	15.8	12.0	60.5	27.5	—	21~23	—	6	Jung ^[18]
SAG	SM-SW	2.72	—	—	65.3	16.4	9.0	—	21~23	—	5	Jung ^[18]
DFA	CL-ML	2.62	17.6	5.3	35.0	50.4	14.6	—	21~23	—	5	Jung ^[18]
Crosby Till	CL-ML	—	41.0	18.0	16.0	50.0	34.0	SC	4,10,20,30,40	TAP	31	Drnevich ^[2]

注：MC、SC、RC 分别代表改进击实方法、标准击实方法、折减击实方法；TAP、DI、SAL 分别代表自来水、去离子水、盐溶液。

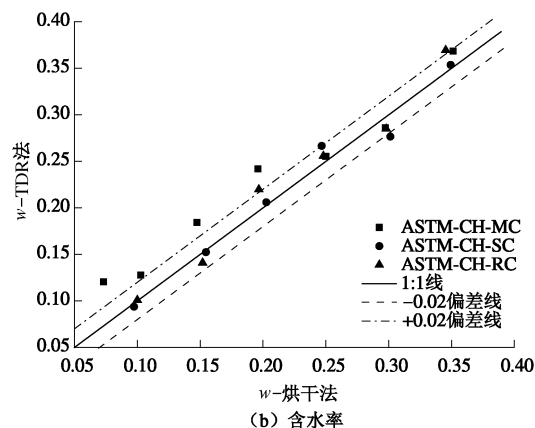
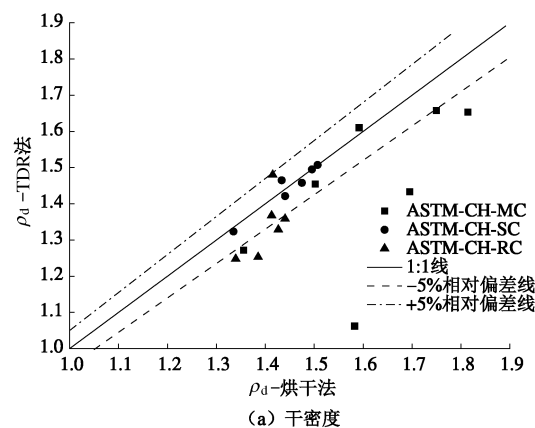


图 6 不同击实功 ASTM-CH 土 (a) 干密度、(b)含水率 TDR 法和烘干法结果比较

Fig. 6 Comparison of (a) dry density, (b) water content by TDR method and oven-dry method for ASTM-CH soil at different compaction energy levels

表 5 干密度和含水率随击实功变化计算结果统计表

Table 5 Errors of dry density and water content with compaction energy levels

类别	干密度			含水率		
击实功	MC	SC	RC	MC	SC	RC
数据点个数	45	43	44	45	43	44
平均偏差	0.042	0.023	0.037	0.011	0.005	0.008
标准差	0.053	0.025	0.030	0.013	0.005	0.008
均方偏差	0.069	0.035	0.049	0.016	0.008	0.011
≤±1%/%	24.4	41.9	13.6	64.4	86.1	68.2
≤±2%/%	44.4	55.8	29.6	84.4	97.7	90.9
≤±3%/%	53.3	79.1	52.3	93.3	100	97.7
≤±4%/%	64.4	86.1	61.4	—	—	—
≤±5%/%	66.7	88.4	75.0	—	—	—

(电导率 EC 值约为 62 mS/m)、NaCl 溶液 (电导率 EC 值约为 130 mS/m) 配制含有不同电导率的孔隙水的试样对 ASTM-CH 土进行了室内标准击实试验。图 7 给出了 ASTM-CH 土样在不同孔隙水电导率溶液的由式 (5)、(6) 计算的干密度值、含水率值与烘干法的对比结果。计算过程中, 标定常数由孔隙水为自来水的试验结果获得。不同孔隙水电导率下土样含水率、干密度的平均偏差、标准差、均方偏差以及偏差分布, 如表 6 所示。

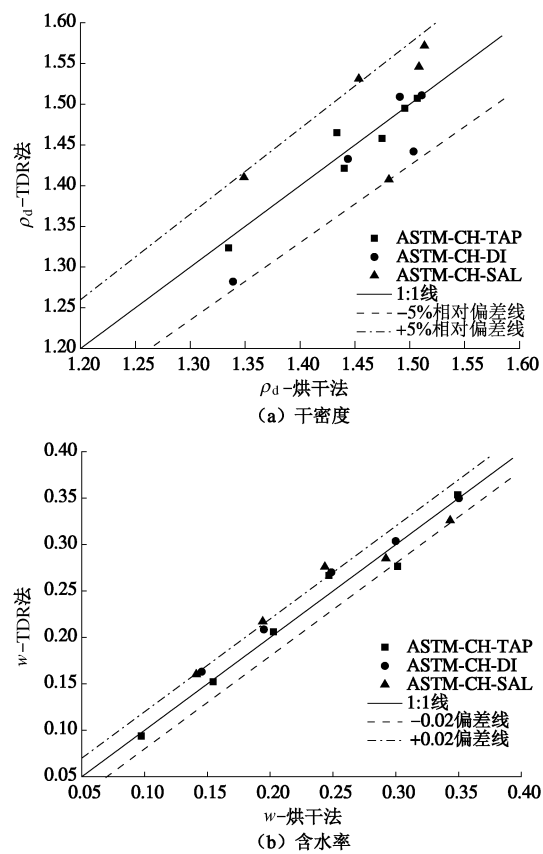


图 7 不同孔隙水电导率 ASTM-CH 土 (a) 干密度、(b)含水率 TDR 法和烘干法结果比较

Fig. 7 Comparison of (a) dry density, (b) water content by TDR method and oven-dry method for ASTM-CH soil with different pore fluid conductivities

表 6 干密度和含水率随孔隙水电导率变化计算结果统计表

Table 6 Errors of dry density and water content with pore fluid conductivities

类别	干密度			含水率		
	TAP	DI	SAL	TAP	DI	SAL
孔隙水						
数据点个数	6	5	5	6	5	5
平均偏差	0.009	0.021	0.042	0.010	0.011	0.020
标准差	0.008	0.018	0.010	0.009	0.008	0.008
均方偏差	0.015	0.035	0.056	0.016	0.018	0.028
≤±1%/%	50.0	40.0	0.00	66.7	40.0	20.0
≤±2%/%	83.3	60.0	0.00	83.3	80.0	60.0
≤±3%/%	100	60.0	0.20	100	100	80.0
≤±4%/%	100	60.0	0.40	—	—	—
≤±5%/%	100	100	0.80	—	—	—

由图 7 和表 6 可以看出, 随着孔隙水电导率的增加, 干密度和含水率计算结果的平均偏差和均方偏差均有增加趋势, 干密度偏差在±5%以内和含水率偏差±0.03 g.g⁻¹以内数据比例也相应减少。总体而言, 各统计指标及偏差水平均处于一个较低水平, 孔隙水电

导率变化对计算结果影响不明显。值得指出的由于数据点偏少, 且孔隙水含盐量处于相对较低水平, 以上结论仍需进一步的验证。

3.3 温度影响

温度对不同类型土体的介电性质影响不同^[25-27]。Pepin 等^[28]和 Persson 等^[29]研究发现对于砂土, 随着温度的升高, 介电常数减少。Drnevlch 等^[2]指出随着温度的升高, 由于大量黏粒的存在, 黏性土的介电常数是增加的。同时, 电导率随温度升高近似呈线性增加^[30], 而电导率和 V_f 值相关。

Drnevlch 等^[2]对 Crosby Till 土样在 4℃~40℃进行了 TDR 测试。图 8 给出了 Crosby Till 土样在不同温度下由式 (5)、(6) 计算的干密度值、含水率值与烘干法的对比结果。值得指出的是图中数据点为按照 ASTM D6780—12^[19]对介电常数和电压降参数修正方法修正到 20℃的结果, 标定常数由 20℃的试验数据获得。

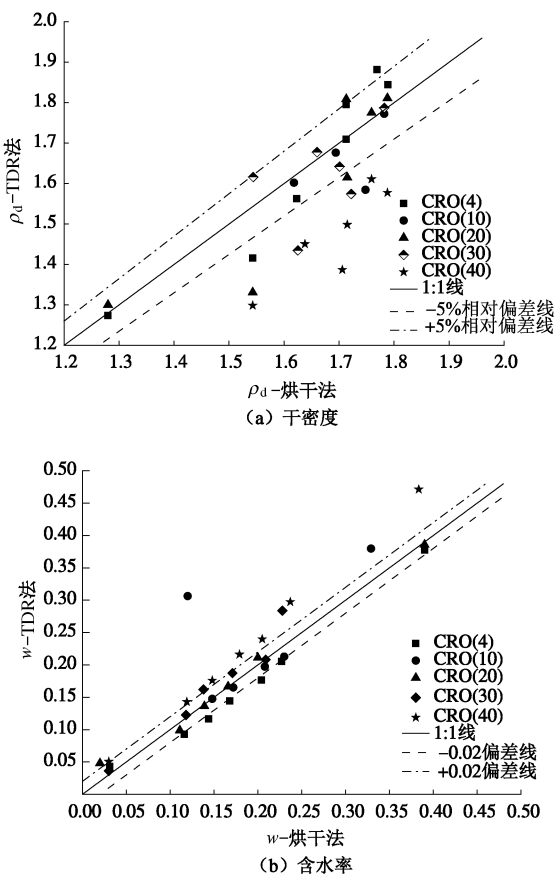


图 8 不同温度下 Crosby Till 土 (a) 干密度、(b)含水率 TDR 法和烘干法结果比较

Fig. 8 Comparison of (a) dry density, (b) water content by TDR method and oven-dry method for Crosby Till soil at under different temperatures

由图 8 可以看出, ASTM 修正方法对 4℃~30

℃时干密度和含水率的修正结果较好，而对 40℃的试验结果不太理想。Drnevich 等^[2]指出对于 5℃~20℃范围的 K_a ，可不进行温度修正。由于电导率对温度变化相对较为敏感，而电压降参数直接和电导率相关联，因此，需要考虑温度修正。对于常见的温度变化范围可按 ASTM D6780—12^[19]修正方法进行修正。

3.4 与原一步法结果比较

将本文标定公式的计算结果与原一步法标定公式的计算结果对比，如表 7 所示。

表 7 干密度和含水率一步法和新经验公式分别计算统计结果
Table 7 Comparison between dry density and water content by Eq. (5) and Eq. (6) and those by Eq. (2) and Eq. (3)

类别	干密度		含水率	
经验公式	式 (2)	式 (6)	式 (3)	式 (5)
数据点个数	182	182	182	182
平均偏差	0.036	0.037	0.011	0.010
标准差	0.043	0.043	0.012	0.010
均方偏差	0.056	0.057	0.016	0.013
≤±1%/%	20.3	23.6	54.4	65.4
≤±2%/%	40.1	40.1	85.2	89.0
≤±3%/%	55.0	55.5	95.6	96.7
≤±4%/%	69.8	64.8	—	—
≤±5%/%	75.3	74.7	—	—

由表 7 可以看出，与原一步法结果相比，干密度计算结果各统计评价指标几乎相同，但与式 (2) 相比，式 (6) 少了一个标定常数，公式形式更加简洁易用。由于原一步法首先计算干密度，再由干密度由式 (3) 得到含水率，这样干密度的偏差将会累积到含水率的计算结果。而式 (5)、(6) 实现了干密度和含水率解耦计算，避免了干密度偏差累积对含水率计算结果的影响，式 (5) 的计算结果各统计评价指标全面优于原一步法，±0.01 g·g⁻¹ 以内比例提高了 10 个百分点。

4 TDR 自适应方法

4.1 TDR 自适应方法

使用式 (5)、(6) 前同样需要对公式中的常量参数进行标定，建立一种 TDR 自适应方法实现对标定常数的预估将会极大地方便 TDR 测试技术在实际岩土工程中的应用。Jung^[18]首次在这方面做出了尝试。

在现场测试中，可以获得介电常数和电压降两个参数，由图 9 可以看出，电压降参数和介电常数间线性关系的斜率值与土体黏粒含量具有较好的相关性。

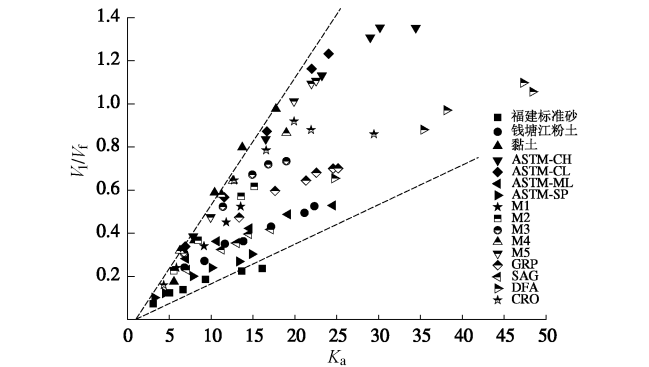


图 9 不同土体电压降参数随介电常数变化图
Fig. 9 Variation of measured parameters by TDR with K_a for soils
采用式 (12) 描述电压降参数和介电常数间的关系:

$$\frac{V_1}{V_f} = k(K_a - 1) \quad (12)$$

建立 k 值与标定公式 (5) 中常数 b 的经验关系如图 10 所示，表达式为

$$b = 0.01154k - 1.44808E - 4 \quad (R^2=0.8993) \quad (13)$$

建立 k 值与标定公式 (6) 中常数 d 的经验关系如图 11 所示，表达式为

$$d = 16.1455 - 963.8064k + 20204.5063k^2 - 144186.9512k^3 \quad (R^2=0.8752) \quad (14)$$

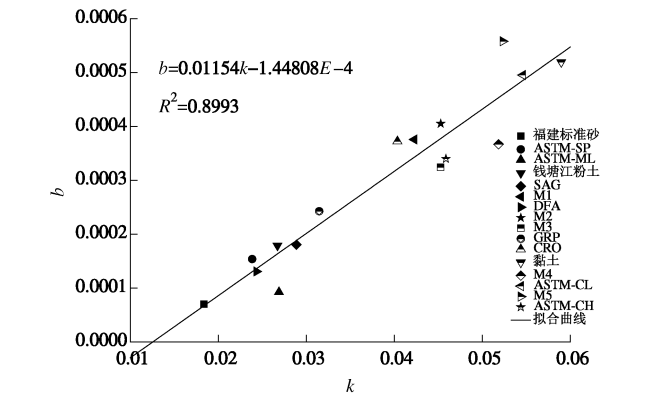


图 10 标定常数 b 与 k 值关系图
Fig. 10 Relationship between b and k for soils

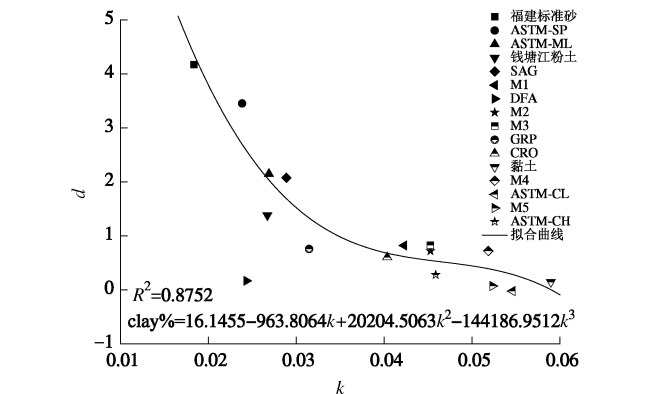


图 11 标定常数 d 与 k 值关系图
Fig. 11 Relationship between d and k for soils

建立 k 值与土体黏粒含量的线性经验关系如图 12 所示。表达式为

$$\text{clay\%} = -22.6096 + 1204.9931k \quad (R^2=0.6304)。(15)$$

将土体样本根据黏粒含量分为 4 个组别, 如图 13、14 所示。

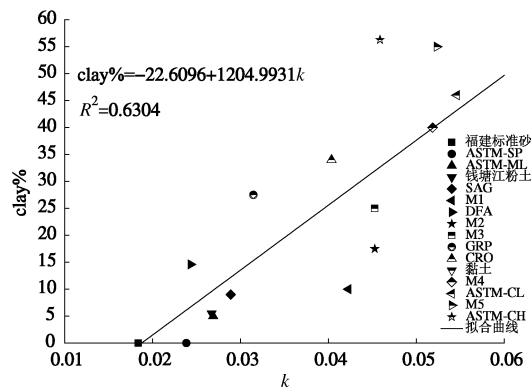


图 12 黏粒含量与 k 值关系图

Fig. 12 Relationship between clay-size fraction and k for soils

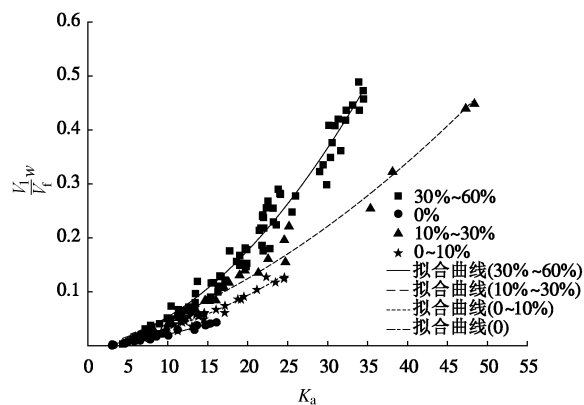


图 13 标定公式 (5) 与黏粒含量关系图

Fig. 13 Relationship between Eq. (5) and clay-size fraction

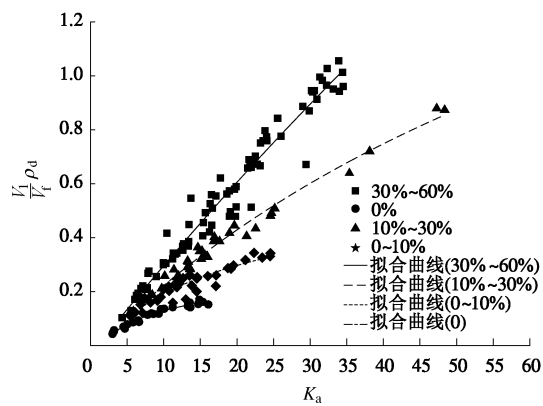


图 14 标定公式 (6) 与黏粒含量关系图

Fig. 14 Relationship between Eq. (6) and clay-size fraction

标定常数 a 值和 c 值根据黏粒含量由表 8 选取。

校正方法步骤总结如下: ①根据现场实测电压降参数值 V_1/V_f 、介电常数值 K_a 确定 k 值。②由 k 值通

过式 (13) 和式 (14) 确定标定常数 b 和 d 的值。③由 k 值通过式 (15) 确定土样黏粒含量, 由表 8 确定标定常数 a 和 c 的值。④由 a 、 b 、 c 和 d 值可获得式 (5)、(6) 的表达式, 进而计算土体的干密度和含水率值。

表 8 a 、 c 随黏粒含量经验值选取表

Table 8 Empirical values of a and c under different clay-size

fractions		
黏粒含量/%	a	c
0	0.00255	29.3868
0~10	0.00436	36.4906
10~30	0.00208	30.2044
30~60	0.00125	33.4527

4.2 现场测试结果

采用 Jung^[18]对 CCO 土样的现场测试数据对上述校正方法进行验证, 得到的干密度和含水率结果如图 15 所示。

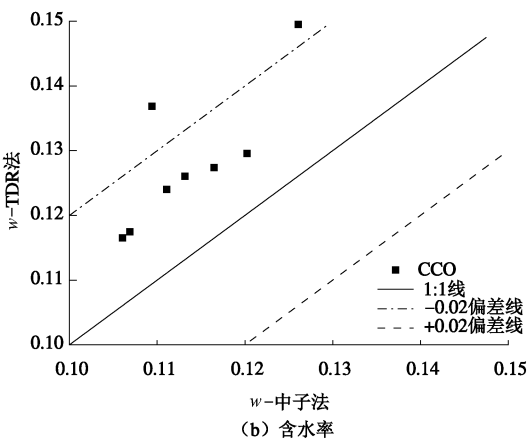
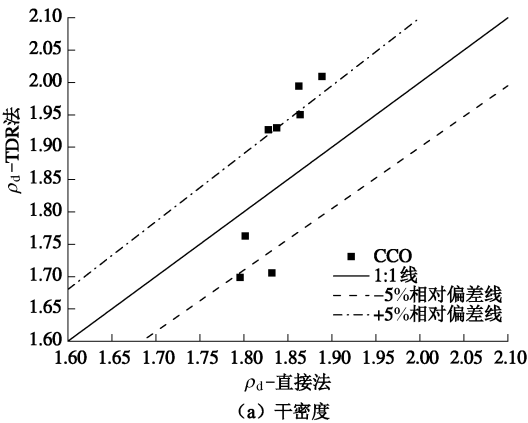


图 15 CCO 土 (a) 干密度、(b) 含水率 TDR 法和中子法结果比较

Fig. 15 Comparison of (a) dry density, (b) water content by TDR method and nuclear gauge for CCO soil

由图 15 可以看出, 尽管没有进行相关标定常数标定工作, 按照自适应方法进行计算, 干密度偏差在

±5%左右,含水率偏差在 $0.02\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右。在现场无标定条件下,采用上述方法可给出较为满意的结果。

5 结 论

本文对土体干密度和含水率与介电常数等电磁参数间经验关系进行了研究,得到以下两点结论。

(1) 提出新的标定公式,其干密度相对偏差在±5%以内,含水率偏差在 $\pm 0.02\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以内,且实现了对含水率和干密度的解耦计算,有效避免了原一步法公式中干密度偏差累积现象,提高了标定精度。标定参数由5个降至4个,形式更加简洁,便于工程应用。

(2) 随着击实功、孔隙水电导率的增加,偏差有加大趋势,在岩土工程常见的土体,对计算结果无明显影响。温度对计算结果有影响,可按ASTM D6780—12^[19]对电压降参数和介电常数进行校正。

(3) 提出一种TDR自适应方法,可在现场无标定条件下给出较为满意的结果。

参考文献:

- [1] NOBORIO K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, **31**(3): 213 - 237.
- [2] DRNEVICH V P, LIN C P, YI Q, et al. Real-time determination of soil type, water content, and density using electromagnetics[R]. West Lafayette: Purdue University, 2001.
- [3] IMHOFF P T, REINHART D R, ENGLUND M, et al. Review of state of the art methods for measuring water in landfills[J]. Waste Management, 2007, **27**(6): 729 - 745.
- [4] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 1 - 46. (CHEN Yun-min. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 1 - 46. (in Chinese))
- [5] 谭捍华, 傅鹤林. TDR 技术在公路边坡监测中的应用试验[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1331 - 1336. (TAN Han-hua, FU He-lin. Testing study of application of time domain reflectometry to highway slope monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1331 - 1336. (in Chinese))
- [6] 梁志刚, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 同轴电缆电磁波反射技术监测滑坡研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 453 - 458. (LIANG Zhi-gang, CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, et al. Studying on applications of coaxial-cable electromagnetic wave reflection technique in monitoring slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 453 - 458. (in Chinese))
- [7] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil-water content: measurements in coaxial transmission-lines[J]. Water Resources Research, 1980, **16**(3): 574 - 582.
- [8] HOOK W R, LIVINGSTON N J. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(1): 35 - 41.
- [9] YU C, WARRICK A W, CONKLIN M H, et al. Two-and three-parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement[J]. Water Resources Research, 1997, **33**(10): 2417 - 2421.
- [10] MASBRUCH K, FERRÉ T P A. A Time domain transmission method for determining the dependence of the dielectric permittivity on volumetric water content[J]. Vadose Zone Journal, 2003, **2**(2): 186 - 192.
- [11] LEDIEU J, DE RIDDER P, DE CLERCK P, et al. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1986, **88**(3): 319 - 328.
- [12] MALICKI M A, PLAGGE R, ROTH C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil[J]. European Journal of Soil Science, 1996, **47**(3): 357 - 366.
- [13] DRNEVICH V P, ASHMAWY A K, YU X, et al. Time domain reflectometry for water content and density of soils: study of soil-dependent calibration constants[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(4): 1053 - 1065.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(5): 397 - 406.
- [17] ZAMBRANO C E. Soil type identification using time domain reflectometry[D]. West Lafayette: Purdue University, 2006.
- [18] JUNG S. New methodology for soil characterization using

- time domain reflectometry (TDR)[D]. West Lafayette: Purdue University, 2011.
- [19] ASTM D 6780—12. Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR)[S]. 2012.
- [20] ASTM D 698—12. Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR)[S]. 2012.
- [21] ASTM D 1557—09. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort[S]. 2009.
- [22] ASTM D 698—07. Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR)[S]. 2007.
- [23] ASTM D 2487—10. Standard practice for classification of soils for engineering purposes[S]. 2010.
- [24] LIN C P. Time domain reflectometry for soil properties[D]. West Lafayette: Purdue University, 1999.
- [25] WRAITH J M, OR D. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development[J]. Water Resources Research, 1999, **35**(2): 361 - 369.
- [26] ROBINSON D A, JONES S B, WRAITH J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal, 2003, **2**(4): 444 - 475.
- [27] SCHANZ T, BAILLE W, TUAN L N. Effects of temperature on measurements of soil water content with time domain reflectometry[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(1).
- [28] PEPIN S, LIVINGSTON N J, HOOK W R. Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, **59**(1): 38 - 43.
- [29] PERSSON M, BERNDTSSON R. Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(4): 887 - 893.
- [30] 王进学. 离子污染饱和和无黏性土电导率特性及 TDR 测试技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (WANG Jin-xue. Electrical conductivities of ionic contaminated saturated sandy soils and TDR measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))

第九届全国基坑工程研讨会（第2号通知）

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办, 郑州大学、中国人民解放军总参谋部工程兵科研三所等联合承办的“第九届全国基坑工程研讨会”将于2016年10月20~22日在河南省郑州市召开。为进一步加强论文征集, 并推进基坑工程主题摄影展等相关工作, 现发出会议第2号通知。

会议主题: ①基坑工程与边坡工程设计理论与工程实践; ②特殊土基坑工程与边坡工程; ③基坑工程环境影响评估与控制; ④基坑工程的风险与评估及安全管理; ⑤基坑工程放陈和监测的新技术、新方法和新设备; ⑥建筑深基坑工程施工安全技术规范(JGJ311—2013)实施应用案例; ⑦地下工程与基坑工程装配化; ⑧地下综合管廊建设中的开挖问题; ⑨重、大、深基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

会议论文征集: 投稿论文须符合上述会议主题, 且未经发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 稿件请参与《岩土力学》基刊的格式要求进行排版。

对经学术委员会推荐、相关期刊编委会评审通过的论文将以《岩土力学》正刊、《岩土力学》增刊和《建筑科学》增刊等形式出版; 经学术委员会评审通过的所有论文将以论文集的形式出版。

论文提交截止日期: 2016年5月1日。论文录用通知及修改通知日期: 2016年6月1日。论文修改返回日期: 2016年7月1日。

摄影图片征集: 为加强学术界与工程界的相互交流, 本次大会拟开展以基坑工程为主题的摄影展, 现进行基坑工程摄影图片征集活动。会议期间将展出优秀摄影作品, 并进行公众评奖和专家评奖, 获奖作品将在大会上进行颁奖。

征集的摄影图片要求能反映基坑工程技术进步、新工艺工法、基坑工程对周边环境的影响及事故与安全等方面的主题, 每人提交图片限于10张, 每张图片附100字以内的文字说明。

提交的摄影图片应拥有自主版权, 并请于8月31日前发至会务摄影图片征集邮箱。

会议秘书处联系地址: 地址: 河南省郑州市科学大道100号郑州大学土木工程学院, 邮编: 450001, 联系电话: 李永辉 15736727876, 靳军伟 18638766102, 张浩 13937126709。

会议论文提交电子邮箱: jkgc2016@126.com。摄影图片提交电子邮箱: jkgc2016pic@126.com。会议网站: <http://www.jkgc2016.org>。

(大会组委会 供稿)