

# 高盐分环境下 TDR 测试高含水率方法研究

曹玉鹏, 邓永锋, 洪振舜

(东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 有效采用 TDR 技术测试土体含水率的关键在于建立介电常数与体积含水率之间的定量关系, 目前常用的介电常数与体积含水率之间的 Topp 经验关系式是建立在低盐分环境下较低含水率条件下的。通过一系列室内试验, 探讨了高含盐量环境下高含水率海相淤泥的介电常数与体积含水率的关系。研究结果表明, Topp 经验关系式不适用于含盐量为 1.5%~4.5% 和质量含水率为 120%~320% 的海相疏浚淤泥。为了快速连续测试海相疏浚淤泥含水率, 提出了一种基于  $w/\theta$  和  $w/k$  坐标系定量分析介电常数与含水率关系的新方法, 建立了  $w/\theta$  与  $w/k$  的线性关系式, 明确了高盐分环境下高含水率疏浚淤泥的介电常数与含水率之间有很好的相关性。同时采用他人已有的试验数据进一步验证了这种方法的有效性。

**关键词:** TDR; 高含水率; 高含盐量; 介电常数

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)12-1916-06

**作者简介:** 曹玉鹏(1985-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事大应变固结理论和疏浚淤泥处理技术研究。E-mail: paradise456917@163.com。

## A method of measuring high water content for marine clay with high salinity by TDR

CAO Yu-peng, DENG Yong-feng, HONG Zhen-shun

(Institute of Geotechnical Engineering, Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The effectiveness of applying TDR technique to measure water content depends on the relationship between the dielectric constant and the water content. The empirical relationship proposed by Topp has been often used in engineering practice. However, the Topp empirical relationship is derived from the test data under the conditions of high salinity and high water content. In this study, a series of tests are performed to investigate the relationship between the dielectric constant and the water content for marine dredged clay with salinity of 1.5%~4.5% and water content of 120%~320%. A new relationship between  $w/\theta$  and  $w/k$  is proposed for the clay with high salinity and high water content. The available data compiled from references are also used to verify the validity of the proposed relationship.

**Key words:** TDR; high water content; high salinity; dielectric constant

## 0 引 言

土体的含水率是岩土工程的一个最基本的物理指标, 实验室量测土体的含水率大多为烘干法, 但是在现场含水率测试时烘干法则可能存在取样困难, 试验量过大等问题, 如高速公路路基含水率的测试、工作量巨大; 疏浚淤泥吹填工程中, 现场取样难; 农林业工程中无法满足长时间现场含水率连续观测要求等困难。随着科学技术的发展, 出现了一系列新的含水率测试技术, TDR (Time domain reflectometry, 时域反射法) 就是其中之一, 20 世纪 70 年代末 TDR 就已经被逐步应用于含水率的测量实践<sup>[1-5]</sup>。

TDR 是一种高频电子脉冲技术, 通过测定电磁波在混合介质中沿波导棒传播的速度, 来确定混合介质

的介电常数。Topp 等<sup>[6]</sup> (1980) 最先将 TDR 技术应用于测定土壤含水率, 与一般的含水率测试方法相比, 该技术具有不破坏土壤原状结构、操作简便、便于原位动态监测、数据自动采集等优越性。但是, 应用 TDR 测定土壤含水率, 基于如下 2 个假定条件<sup>[7]</sup>: ①土壤中孔隙水的介电性质等同于自由水的介电性质; ② TDR 测得的土壤介电常数等于实际土壤的介电常数。在此前提下, 测定值的准确度则主要依赖于测定的土壤介电常数与土壤体积含水率之间的关系式。Topp 等忽略了土壤组成成分对介电常数的影响作用, 定义

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878050, 50908049); 国家高技术研究发展计划 (863 项目) (2007AA11Z135)

收稿日期: 2009-06-22

TDR 测得的介电常数为表观介电常数, 建立了表观介电常数与土壤体积含水率之间的经验关系式。随着研究的深入进行, Herkelrath 等<sup>[8]</sup> (1991)发现该关系式不适用于具有大比表面积的黏土和高电导的盐碱土等一些特定土壤。另外, 必须指出的是, 20 世纪 70 年代至今的大多数关于 TDR 测试含水率的研究成果<sup>[9-14]</sup>, 基本上是在纯水或含极少量溶质的土壤环境中进行的, 而其质量含水率  $w$  (土中水的质量与土颗粒质量的比, 以 % 表示) 基本上低于 60%, 孔隙水含盐量大都低于 1%。

实际工程中, 经常遇到高含盐量海相疏浚淤泥中高含水率测定和连续观测问题, 如海洋疏浚淤泥的水介质含盐量为 3% 左右, 而质量含水率一般大于 100%, 甚至达到 300%~500%, 如何应用 TDR 技术测试高含盐量环境下高含水率的疏浚淤泥在自重或者外荷作用下固结过程中含水率的变化是一个崭新而实际迫切需要解决的问题。本文通过系列 TDR 试验, 研究孔隙水含盐量 1.5%~4.5% 时 TDR 测试高含水率 (质量含水率 120~320%) 的介电常数  $k$  与土体体积含水率  $q$  之间的关系, 探讨 Topp 的经验关系对高含盐量和高含水率的适用性, 并提出适用于高盐分环境下高含水率淤泥的 TDR 测试方法。

## 1 TDR 测试土体含水率原理及探头

用于土体含水率量测的 TDR 时域反射仪 (Mini TRASE) 主要由两个部分组成, 一为用于信号监测的同轴电缆探测仪, 二为用于引导信号在介质中传输的探头。同轴电缆探测仪包含: ①电磁波发生器, 它用于输出具有非常快的起升时间 (120 ps) 的方形高频电磁波信号; ②示波器, 用于接收和分析方形电磁波的反馈时间。MiniTRASE 所用探头为三个平行的波导棒, 波导棒均固定于防水的硬质绝缘材料的把手上, 并通过同轴电缆与探测仪相联使用。TDR 测试土体含水率装置与原理如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

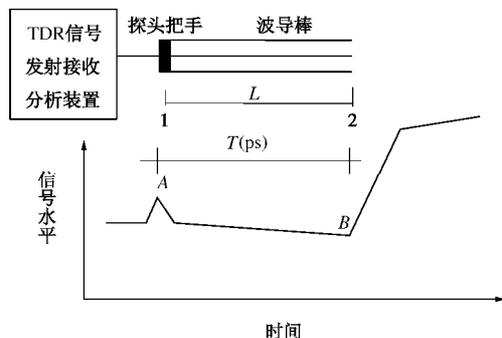


图 1 TDR 测试原理

Fig. 1 Principle of TDR

通过 TDR 测试得到的是电磁波从发射到接收(穿

过土体)所需要的时间  $T$ 。而电磁波在介质中传播速度由表达式 (1) 确定<sup>[1-4]</sup>:

$$V = C / (km)^{0.5} = L / T \quad (1)$$

式中  $C$  为电磁波在真空中传播速度, 为常值 300 km/s;  $k$  为介质的介电常数;  $m$  为介质的磁性系数, 土壤的磁性系数为 1;  $L$  为电磁波在介质中传播距离;  $T$  为电磁波在介质中传播时间。由此可以得到的岩土体介电常数的表达式

$$k = (CT / 2L)^2 \quad (2)$$

式 (2) 中  $C, L$  已知, 同时  $T$  可以量测出来, 从而可以计算得到所量测土体的介电常数  $k$ 。土体由固相 (土颗粒)、液相 (孔隙水) 和气相 (孔隙气) 三相组成, 对于土颗粒而言, 介电常数一般为 2~4 左右, 空气的介电常数为 1, 而水的介电常数通常在 80 左右。空气和土颗粒的介电常数远远小于水的介电常数, 对于空气和土颗粒变化而引起介电常数的变化可忽略不计, 因此土壤的介电常数取决于土体的含水率<sup>[2]</sup>。因此, 只要建立介电常数与土体含水率之间关系, 便可根据测定得到的介电常数获取土体的含水率。

Topp 等<sup>[6]</sup> (1980) 对不同土壤进行测试, 建立土体介电常数与体积含水率的经验式为

$$k = 3.03 + 9.3q + 146q^2 - 76.7q^3 \quad (3)$$

式中  $q$  为土体的体积含水率 (土中水的体积与土水总体积之比), 以 % 表示。体积含水率与质量含水率的换算关系为

$$q = rw / (1 + w) \quad (4)$$

式中  $r$  为土体的密度。

采用 TDR 量测得到土体的介电常数后, 通过式 (3) 即可计算土体的体积含水率, 然后由式 (4) 可以得出常用的质量含水率  $w$ 。Topp 等<sup>[6]</sup> (1980) 进行了试验温度 (范围为 10~36°C) 对土体介电常数  $k$  影响研究, 未发现温度对土壤介电常数有明显的影响, 同时 Zagorskii 等<sup>[15]</sup> (1982) 也报道在 5°C 以上, 介电常数  $k$  不随温度的变化而变化。Jacobsen 等<sup>[16]</sup> (1993) 探讨了土壤重度、黏粒含量、有机质含量等因素对介电常数  $k$  与体积含水率  $q$  关系的影响, 并建立了包含这些因子的  $k-q$  经验关系式, 他认为黏粒含量和有机质含量等对介电常数的影响作用很小, 但如果能够考虑土壤重度的影响将提高含水率的测试精度。Chen 等<sup>[17-18]</sup> (2007, 2009), Jonse 等<sup>[19]</sup> (2004) 为减少 TDR 信号衰弱对含水率测试的影响, 采用表面拟合法、表面系数法以及频域内的散射函数拟合法来提高含水率的测试精度。

TDR 测试技术中, 目前常用的探头有两种, 一种为普通探头 (图 2 (a)), 另外一种为盐分探头 (图 2 (b))。盐分探头与普通探头区别在中间的波导棒上包

裹一层环氧树脂，从而增大阻抗。在高盐分环境条件下一般采用如图2(b)所示的盐分探头。

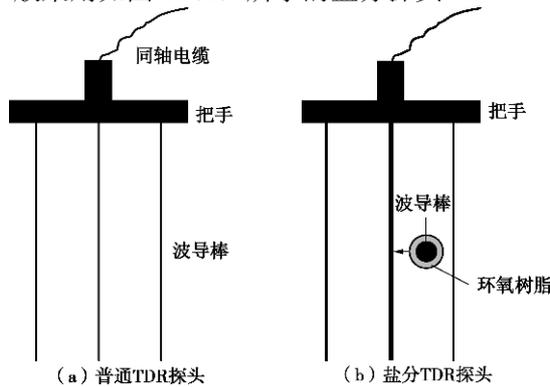


图2 TDR测试常用探头

Fig. 2 Probes for TDR

## 2 试验方案

结合本文的研究目的，试验采用了7个不同的TDR探头进行研究，其中1个为澳大利亚进口原装盐分探头，其余6个为基于国内一般探头改进后的探头，如表1所示。改装仿照进口盐分探头，即在普通探头的中间的波导棒上包裹上内径与波导棒直径一致的柔性聚氯乙烯管，并在管口进行密封处理。

表1 探头种类

Table 1 Types of probes

探头编号	探头类别	探头芯材	探头产地
探头1	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头2	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头3	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头4	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头5	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头6	国内改装探头	聚氯乙烯	中国
探头7	国外盐分探头	环氧树脂	澳大利亚

试验土源为福建省可门港的疏浚淤泥，具体物理指标如表2所示，其中液塑限采用100g锥式液塑限联合测定仪测定，有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定，颗分试验(黏粒含量)采用马尔文公司的MAF5000激光粒度分析仪测定。

表2 可门港疏浚淤泥物理参数

Table 2 Physical properties of kemen dredged clay

液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	黏粒含量/%	比重	有机质含量/%
61.1	30.3	42.0	2.65	1.98

表2表明可门港疏浚淤泥的黏粒含量很高，占42.0%，土的液限和塑性指数也很高，分别为61.1%和30.8%，有机质含量小于3%。表3为可门港海水的离子含量，由等离子体质谱仪测定。海水密度为1.02 g/cm<sup>3</sup>，含盐量为3%。

考虑到海洋疏浚淤泥初始含水率很高，本文进行

了6个质量含水率为120%，160%，200%，240%，280%，320%（相应的体积含水率为76%~90%）的试验。每一个含水率的淤泥又分别进行了含盐量为1.5%，3.0%，4.5%的试验。在配置淤泥时，先选取同一质量同一初始含水率的疏浚淤泥6份，根据上述的6个不同质量含水率计算所需要添加水的质量，根据淤泥含水的总质量按上述3个不同的配比计算海盐的质量，将海盐充分溶于需要添加的水中，然后分别将溶有海盐的水添加到淤泥中搅拌均匀，需要说明的是，这里的含盐量为孔隙水的含盐量，配制淤泥时采用离子成分为表3所述的海盐。

表3 海水离子成分

Table 3 Ion Composition of the seawater

主要离子种类	硫酸根	硝酸根	氯	钠	钾	钙	镁
含量/(mg·L <sup>-1</sup> )	2535	10.3	15595	6500	383.1	163.8	1300

在不同初始含水率和含盐量的淤泥配制完成后，采用TDR分别测试土体的介电常数，同时采用烘干法测试淤泥对应的质量含水率。

## 3 试验结果分析

图3为福建可门港疏浚淤泥的孔隙水在不同含盐量(1.5%，3.0%，4.5%)时，采用TDR(Mini TRASE)测得的介电常数 $k$ 与土体体积含水率 $q$ 之间关系图。图3表明当孔隙水含有一定的盐分后，介电常数与体积含水率的关系与Topp等<sup>[6]</sup>提出的表达式(3)存在较大的出入，即在同一体积含水率时，采用盐分探头(国外探头或者国内改装探头)测得的介电常数远小于按Topp公式计算得到介电常数，因此不能用常规的Topp经验式来测量高含水率高盐分环境下海相疏浚淤泥的含水率。

本文引入质量含水率 $w$ 这一与体积含水率密切相关的物理量，采用 $w/q$ 和 $w/k$ 坐标系对介电常数与含水率的关系进行整理，结果如图4所示。图4表明在此坐标系下不同含盐量时，各种探头得到数据经过整理后的 $w/q$ 与 $w/k$ 数据点都呈良好的线性关系，相关系数均超过0.95，其表达式为

$$w/k = aw/q + b \quad (5)$$

式中 $a$ 、 $b$ 为 $w/q$ 与 $w/k$ 关系拟合系数，针对某一含盐量条件为常数； $w$ 为质量含水率； $q$ 为体积含水率； $k$ 为介电常数。

联合式(4)，(5)，可得

$$q = (ak + bkr) / (1 + bk) \quad (6)$$

通过TDR测得介电常数 $k$ ，由式(6)计算即可得到土体的体积含水率 $q$ 。

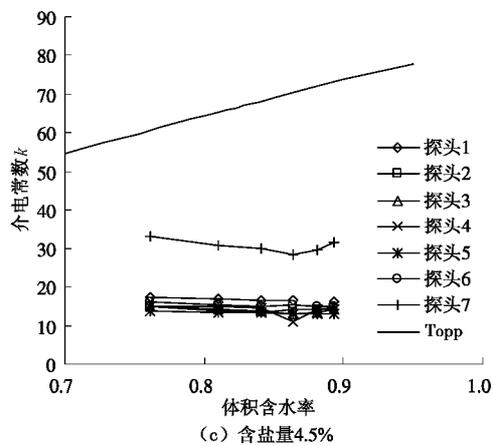
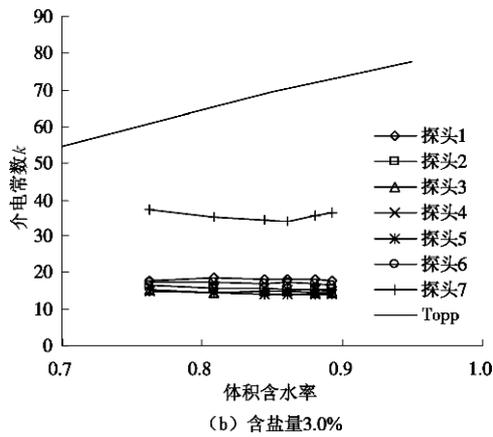
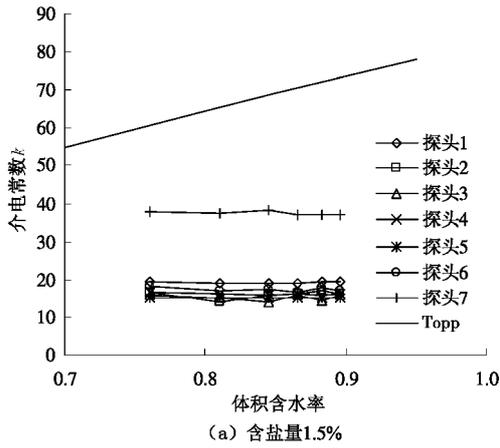


图 3 介电常数与体积含水率关系

Fig. 3 Relationship between dielectric constant and water content

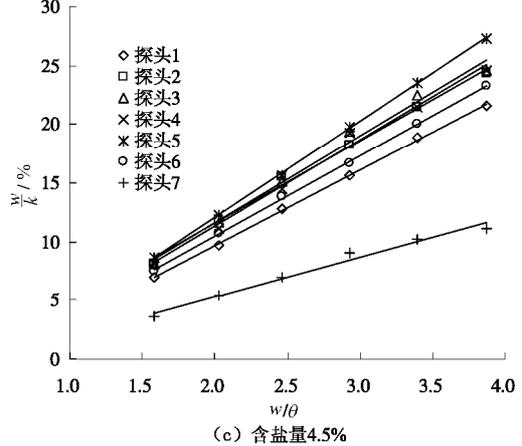
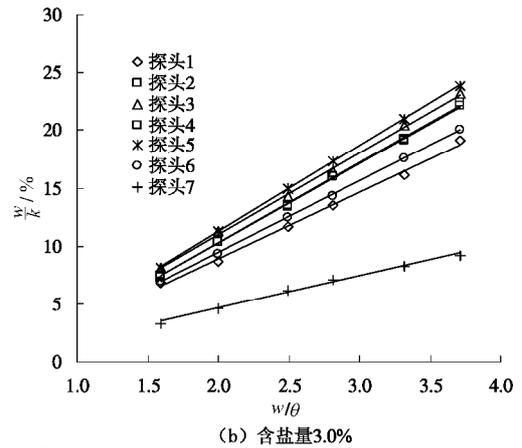
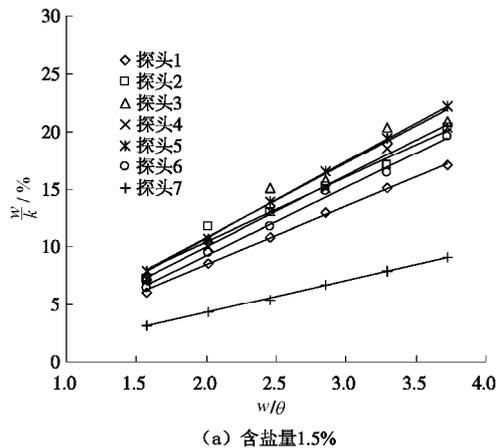


图 4  $w/q$  和  $w/k$  关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $w/q$  and  $w/k$

对比图 4 (a), (b), (c) 可以看出, 本文通过 TDR 测得的介电常数  $k$  随着含盐量 (电导率) 的增大而降低。最初的一些关于介电常数与电导率关系的研究结果表明, 土壤电导率不对 TDR 测定结果产生影响。例如: Topp 等<sup>[6]</sup>的试验结果表明, 土壤电导率的变化来自于盐分含量或含水率的变化, 但电导率的改变并未影响到 TDR 测得的介电常数与含水率之间的关系; Dalton 等<sup>[20]</sup>在电导率 0.8~11.1 ds/m 范围内试验得到与 Topp 相似的结论; Bonnell 等<sup>[21]</sup>也认为, 即使在含有复杂盐溶液土壤上, 也不影响 TDR 测得的含水率值的准确性。Dalton<sup>[22]</sup>曾给出一新的结论: 当土壤孔隙水溶液电导率接近或大于 8 ds/m 时, 会使土壤含水率的推算值偏高。介电常数是反映介质绝缘能力特性的一个系数, 电导率反映土的导电能力, 在 TDR 技术中电导率虽然影响着介电常数的测定, 但二者关系不是十分明确。目前为止学者的探讨皆在含盐量较低的情况下进行的, 电导率大都低于 16 ds/m, 得到的结论也在此范围内有效, 而本文电导率在 20~66 ds/m 之间, 得出的 TDR 测得的介电常数与电导率的关系与已有的结论有所不同, 这也与图 3 得出的常规 Topp 经验式不适用于测试高盐分环境下海相疏浚淤泥含水率的结论是一致的。当然, 本文的研究目的在于为 TDR 应用于海相疏浚淤泥实际工程提供一条新的路径, 抛

砖引玉，以期能够积累更多相关试验数据，进一步明确高含盐量环境下介电常数与电导率之间关系。

图4为根据福建可门港淤泥采用新坐标体系整理得到的规律，为了进一步验证w/q与w/k关系的合理性和对其他土的适用性，本文引用了Topp(1980)<sup>[6]</sup>，Yasser Hamed等<sup>[13]</sup>(2003)，Take等<sup>[14]</sup>(2007)的数据进行验证。图5为引用文献中数据按w/q-w/k坐标拟合结果，验证了w/q与w/k关系的合理性；图6为上述文献中实测的体积含水率与按图5拟合曲线计算得到体积含水率的对比，图6的结果表明上述三者体积含水率的数据与采用新的经验关系式得到的体积含水率数据基本一致，验证了w/q与w/k关系的有效性。

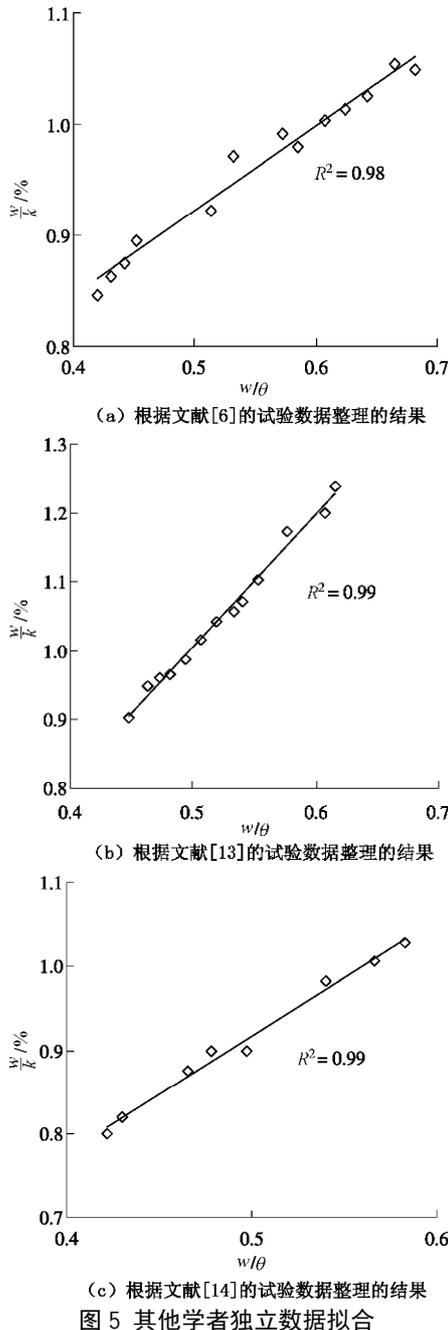


图5 其他学者独立数据拟合

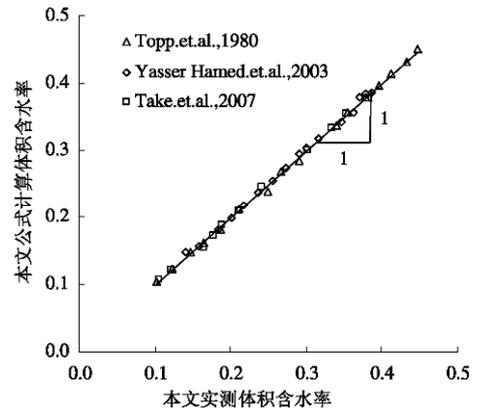


图6 实测与计算含水率对比

Fig. 6 Comparison between measured and calculated data

### 4 结 论

本文通过室内试验探讨了高盐分环境下 TDR 测试高含水率方法的研究，基于系列试验数据进行分析，得到以下几点结论。

(1) Topp 建立的土体介电常数与体积含水率的经验关系式，不适用于含盐量为 1.5%~4.5% 和质量含水率为 120%~320% 的海相淤泥，也就是传统上广泛应用于低含盐量条件下含水率不高于 60% 的 Topp 经验关系式不能应用于海相疏浚淤泥；

(2) 提出了采用 w/k 和 w/q 坐标体系描述土体含水率与介电常数关系的方法，给出了相应的定量表达式，并采用他人发表的独立试验数据验证了本文所提方法的有效性。

### 参考文献:

[1] 周刘宗, 周凌云, 徐梦熊, 等. 田间土壤含水率的原位测定[J]. 土壤, 1996(4): 213 - 216. (ZHOU Liu-zong, ZHOU Ling-yun, XU Meng-xiong, et al. In situ measurement of soil's water content[J]. Soils, 1996(4): 213 - 216. (in Chinese))

[2] 程先军. 根据 TDR 原理测量土壤含水率[J]. 水利水电技术, 1995(11): 36 - 38. (CHENG Xian-jun. Water content measurement by TDR[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995(11): 36 - 38. (in Chinese))

[3] 李笑吟, 毕华兴, 刁锐民, 等. 土壤水分测定系统的原理在黄土高原土壤水分监测中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 112 - 115. (LI Xiao-yin, BI Hua-xing, DIAO Rui-min, et al. The measurement principle of TRIME-TDR system and its application in Caijiachuan watershed of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(1): 112 - 115. (in Chinese))

[4] 段爱旺. 时域反射仪(TDR)及其应用[J]. 灌溉排水, 1995,

- 14(1)**: 41 - 45. (DUAN Ai-wang, Theory and application of TDR method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1995, **14(1)**: 41 - 45. (in Chinese))
- [5] 柴世伟, 刘文兆, 张聚庭. TDR 研制与应用方面的若干进展[J]. *中国生态农业学报*, 2001, **9(2)**: 97 - 99. (CHAI Shi-wei, LIU Wen-zhao, ZHANG Ju-ting. Some progress in TDR manufacture and application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, **9(2)**: 97 - 99. (in Chinese))
- [6] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resource Research*, 1980, **16(3)**: 574 - 582.
- [7] 曹巧红. 土壤因子对时域反射仪测定含水率的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 1999. (CAO Qiao-hong. Effect of soil's parameters to measurement of water content by TDR[D]. Beijing: China Agricultural University, 1999. (in Chinese))
- [8] HERKELRATH W N, HAMBURG S P, MURPHY F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry[J]. *Water Resour, Res*, 1991, **27**: 857 - 864.
- [9] 马文敏, 康金虎. TDR 在土壤盐分测试中的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2004, **6(10)**: 10 - 12. (MA Wen-min, KANG Jin-hu. Experimental research on application of TDR in soil salinity test[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004, **6(10)**: 10 - 12. (in Chinese))
- [10] 康金虎, 黄 凌, 马文敏. TDR 技术测定土壤溶质及标定研究[J]. *宁夏农学院学报*, 2004, **25(2)**: 35 - 38. (KANG Jin-hu, HUANG Ling, MA Wen-min. Calibration on measurement of soil dissolving using time domain reflectometry (TDR)[J]. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2004, **25(2)**: 35 - 38. (in Chinese))
- [11] 席琳乔, 余建勇, 张利莉. TDR 技术测定盐碱地土壤盐分和水分及标定研究[J]. *塔里木大学学报*, 2007, **19(3)**: 6 - 10. (XI Lin-qiao, YU Jian-yong, ZHANG Li-li. Calibration on measurement of soil salinity and water using time domain reflectometry (TDR) [J]. *Journal of Tarim University*, 2007, **19(3)**: 6 - 10. (in Chinese))
- [12] 孙玉龙, 都振纯. TDR 技术及其在土壤水分及土壤溶质测定方面的应用[J]. *灌溉排水*, 2000, **19(1)**: 37 - 41. (SUN Yu-long, DU Zhen-chun. TDR Method and its application in soil's water content and pore water solution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2000, **19(1)**: 37 - 41. (in Chinese))
- [13] YASSER HAMED, MAGNUS PERSSON, RONNY BERNDTSSON. Soil solution electrical conductivity measurements using different dielectric techniques[J]. *Soil Science Society of American*, 2003, **67(4)**: 1071 - 1078.
- [14] TAKE W A, AMEPALI D N, BRACHMAN R W I, ROWE R K. Laboratory and field calibration of TDR probes for water content measurement[C]// *WattawaGeo*, 2007: 1865 - 1871.
- [15] ZAGOSKII V V, NESTEROY V M, AZMORTINSKAYAE A, et al. Dependence of dielectric permittivity of moisture disperse materials on the temperature[J]. *Sov Phys J (Eng Trans)*, 1982, **25**: 62 - 65.
- [16] JACOBSEN O H, and SCHJONNING P A. Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, **151**: 159 - 172.
- [17] CHEN R, DRNEVICH V P, YU X, et al. Time domain reflectometry surface reflections for dielectric constant in highly conductive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133(12)**: 1597 - 1608.
- [18] CHEN R P, XU W, CHEN Y M. Measuring dielectric constant in highly conductive soils based on surface reflection coefficients[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009, **135(12)**: 1883 - 1891.
- [19] JONES SCOTT B, OR DANI. Frequency domain analysis for extending time domain reflectometry water content measurement in highly saline soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**: 1568 - 1577.
- [20] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS S, RHOADES J D. Time domain reflectometry: Simultaneous measurements of soil water content and electrical conductivity with a single probe[J]. *Science*, 1984, **224**: 989 - 990.
- [21] BONNELL R B, BROUGHTON R S, ENRIGHT P. The measurement of soil moisture and bulk soil salinity using time domain reflectometry[J]. *Canadian agricultural engineering*, 1991: 225 - 229.
- [22] DALTON, F N. Development of time domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity[C]// TOPP G C, ed. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bring Theory Into Practice*. Soil Sci Soc Am, Madison, WI, SSSA Spec. Publ.30, 1992: 143 - 167.