

DOI: 10.11779/CJGE201704014

基于范德堡法的非饱和土电阻率测试方法

冯怀平^{1,2}, 马德良¹, 王志鹏¹, 常建梅¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘要: 电阻率法是实现无干扰土体压实度及水分迁移测试的一种有效方法。范德堡法(vdP法)广泛应用于半导体等材料的电阻率测量领域, 有较高的精度, 将该方法引入非饱和土电阻率测试, 研发了一种只接触土体表面而不破坏土体结构的土体电阻率测试装置及方法, 装置由钛电极片、交流恒流源、电压采集及数据处理系统4部分组成。采用此装置对某粉黏土的电阻率进行了测试研究, 验证了电极尺寸、试样高度以及温度对于测试精度的影响; 测试了不同含水率、压实度下土体电阻率的变化规律, 试验表明所提供的测试方法具有精度高、测试稳定、对土样无干扰等优点。

关键词: 范德堡法; 非饱和土; 电阻率; 含水率

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)04-0690-07

作者简介: 冯怀平(1975-), 男, 副教授, 主要从事非饱和土测试及数值模拟等方面的教学和科研。E-mail: fenghuiping@stdt.edu.cn。

Measurement of resistivity of unsaturated soils using van der Pauw method

FENG Huai-ping^{1,2}, MA De-liang¹, WANG Zhi-peng¹, CHANG Jian-mei¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway

Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The electrical resistivity method is the main non-destructive method for measuring compaction and moisture migration of the unsaturated soils. The van der Pauw method is a well established technique for measuring the resistivity of semiconductor materials with high accuracy and suitable for a wide range of materials. The present investigation is focused on the development of an apparatus to measure the electrical resistivity and sample properties of soils based on the van der Pauw method. The proposed device consists of four parts: (1) a sensor head, which includes four Ti electrodes, (2) an AC constant current source which sends current into soils, (3) dynamic strain indicator which detects the voltage between other two electrodes, and (4) data processing system. The device is evaluated through tests on clay samples. The factors which affect the measurement accuracy, such as depth of samples, size of electrodes, temperature, are tested. By using the proposed method, the relationship among the electrical resistivity, water content and compaction of samples is investigated. The main advantages of the proposed device are high accuracy, measurement stability and no disturbance.

Key words: van der Pauw method; unsaturated soil; electrical resistivity; water content

0 引言

土的电阻率测试对于研究土体的工程特性^[1-3]及环境评价^[4-6]有着极为重要的价值。土的电导率与多项因素有关, 比如: 离子类型、浓度、压实度、含水率、土的矿物组成等^[7-8]。利用电阻率法可以研究土的含水率、晶体尺寸、密度、孔隙度、孔隙率、液塑限等参数^[9-12]。在冻土工程中研究者^[13-14]使用电阻率针对冻土的工程性质进行了研究。Archie^[7]土的电阻率公式表明土的结构性因子F对电阻率有较为明显影响, 基于此, 研究者^[15-16]提出了利用电阻率法定量测试土体微

观结构特性变化的方法, 同时研究者^[17-19]基于结构性参数及水体积比与电阻率之间的关系, 提出了基于电阻法测试基质吸力及土水特性曲线的方法。同理通过判断生石灰及粉煤灰改良膨胀土过程中土体结构性的变化, 提出基于电阻率法测试改良土物理化学反应程度的评价判断方法^[20]。

土体电阻率测试主要采用欧姆法(二电极法)^[21-24], 一般采用黄铜、不锈钢圆盘作为电极, 电极尺寸要与

试样截面积一致以保证土样中电流均匀; 为避免出现极化现象, 采用铜镀镍涂层设计电极材料及交流电供电的方法^[25]。相对于二电极法, 四电极法对试样要求较低, 一般在土中放置两个电极并施加一额定电流, 而后测量位于两电极之间两点间的电压, 根据电流与电压的关系可以计算出电阻率的大小, 探针之间距离相同时称为 Wenner 组态^[26], 取任意距离时, 称为 Schlumberger 组态^[27-28]。然而, 由于四电极法测试为非均匀电流场, 因此对土样的均匀性有较高的要求, 在测试分层较为明显土体时存在一定精度影响。同时与二电极法类似, 四电极法测试要求保证在测试过程中 4 个探针与土的紧密接触, 在实际操作中该要求不容易把握, 特别是在测试含水率较低的土体时很容易引起误差。

同时, 在含水率测试过程中对于不破坏土样的要求越来越高, 如非饱和土的土水特性曲线测试以及古城遗址墙体的水分迁移规律测试^[29]等都要求在测试过程中不能破坏土样。有时电阻率测试需要与其他力学试验同步进行^[30], 这对电阻率的无损、实时测试技术提出了更高的要求。

vdP 法^[31]是一种广泛应用于均匀厚度的任意形状固体金属、半导体、电解质溶液等的电阻率测试方法。该方法还具有仅与测试体厚度相关, 而与测试体的形状无关的优点^[32]。Nahlik 等^[33]研究表明基于 vdP 法中只要探针电阻相对于测试体足够小, 探针的形状对于测试造成的影响可以忽略。因此, 将 vdP 法引入土体的电阻率测试中, 可以实现不破坏土样、接触电阻影响小的优点, 且可实现与土样的力学性质试验同步进行。

本试验开发了一套基于 vdP 法的非饱和土样电阻率测试装置与方法, 并采用该装置验证了其在土体电阻率测试中的敏感性影响因素。

1 vdP 法测试原理

vdP 法的 4 个电极分别放置于测试样品边缘四周, 如图 1 所示, 其中任意相邻两个电极 (a 和 b) 上提供恒定电流 I_{ab} , 测定另外两个电极 (c, d) 上产生的电压 U_{cd} , 由此可以计算出测试电阻 $R_{ab,cd} = U_{cd} / I_{ab}$, 同时改变电极得到电阻 $R_{ad,bc}$ 。则根据下式可以计算出所测物体的电阻率。

$$\exp\left(\frac{-\pi R_{ab,cd} d}{\rho}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_{ad,bc} d}{\rho}\right) = 1, \quad (1)$$

式中, d 为测试样品厚度, ρ 为样品电阻率。式 (1) 无法直接求解, 但其关于 ρ 单调递减, 采用二分法或者牛顿迭代法较为容易求出其值。

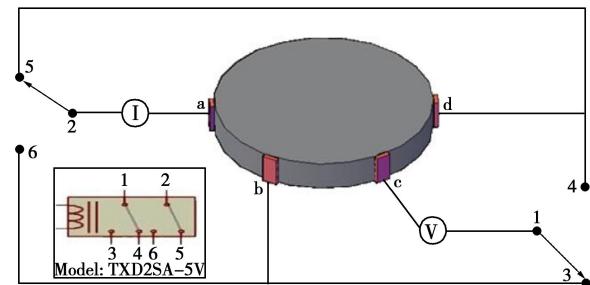


图 1 vdP 法测试土体电阻率示意图

Fig. 1 Contact arrangement for resistivity measurement using van der Pauw method

2 测试装置

本测试系统主要由 4 部分组成: 测试电极、切换装置、交流恒流源、Agilent 精密信号采集仪, 测试系统如图 2 所示。

(1) 测试电极

防止极化且柔韧性好是选择电极材料的两个关键因素, 本文采用了 0.02 mm 的钛箔, 相对于铜箔等材料, 钛箔具有良好的导电特性及防极化性能, 试验也表明尽管采用交流电, 铜箔作为电极仍会出现漂移的问题, 而钛电极可以有效避免。每个测试单元都由 4 个焊接好的钛箔片组成, 钛箔与导线连接后分别按照试验设计位置通过胶固定到三轴膜上, 利用三轴膜的弹性保证了电极与土样的充分接触, 如图 2 所示。

(2) 交流恒流源

由于土中存在各种矿物离子, 电阻率测试过程中, 极易出现极化现象, 在选择合适惰性电极的同时, 采用交流电流是避免极化现象的常用做法。试验采用的交流恒流源可输出恒定的交变电流, 输出电流大小可调范围为 0~1 mA, 输出波形为正弦波, 电流频率调节范围 100~1000 Hz。

(3) 切换装置

根据范德堡法基本原理, 测试过程中需要实现一次电极的切换如图 1 所示, 以实现测试 $R_{ab,cd}$ 及 $R_{ad,bc}$ 的测试, 传统方法一般采用手动切换方法进行, 在进行批量试验时较为费力且影响测试速度, 本试验开发了具备双刀双掷开关功能的芯片, 通过 USB 接口与电脑采集软件通讯连接, 测试中通过控制电磁线圈实现线路在 1 (2) ~ 4 (5) 或 1 (2) ~ 3 (6) 之间的自动切换。

(4) 采集装置

试验采用的电压测量装置是 Agilent Technologies E8084A 以及 VT1436 VXI Modules 模块。该模块拥有 51.2 k Samples /Sec /Channel 的扫描速度, 还可以提供可选 Voltage, Charge, Microphone or IEPE 输入信号模

式。可一次性返回 64 to 8192 扫描点的数据。

通过测试电极、切换芯片，交流恒流源，电压测定装置，组成的一套基于 vdP 法的电阻率测试装置，并且编写具有采集、控制、后处理功能的数据采集系统，使试验测试更高效稳定。

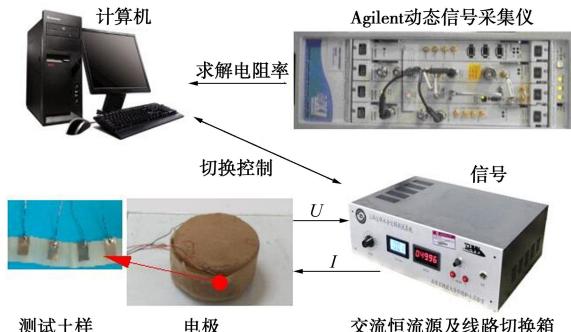


图 2 测试系统

Fig. 2 Setup for measuring resistivity of soils by van der Pauw method

3 测试方案

试验用土取自朔黄铁路 K86+860—K87+410 段，土性为粉质黏土，土的基本物理性质见表 1 所示。

表 1 试验用土基本物理性质

Table 1 Parameters of soils in tests

比重 G_s	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率/%	液限/%	塑限/%
2.72	1.93	14.4	25	16

本研究主要进行了 3 方面的室内试验：

(1) 土样合理厚度及电极尺寸研究。vdP 法测试扁平试样的电阻率时具有很好的精度，但试验中对试样有扁平的要求，同时电极的尺寸大小也影响测试结果。因此分别进行了改变电极尺寸与土样厚度的土体电阻率测试试验。试验制备了直径为 39.1 mm，含水率为 8%，压实度为 90% 的土样，主要进行了两种类型的试验：一是采用的钛电极尺寸分别为 5 mm×10 mm、5 mm×15 mm、5 mm×20 mm、5 mm×25 mm、5 mm×40 mm 和 5 mm×50 mm 6 种，土样高度与每种钛电极等长，在此称其为全电极测试方案；二是高度为 8 cm 土样在不同长度的钛电极（宽度 5 mm，长度分别为 5, 10, 15, 20, 25, 40, 50 mm）对试样端部电阻率的影响，如图 3 所示。

(2) 温度对土体电阻率测试的影响。将贴好钛电极的试样用保鲜膜裹住，并引出线，为防止土样中水分试验放置过程中发生蒸发，沿保鲜膜外围涂上凡士林，放置在玻璃板上，并用小烧杯遮住，放进温控箱，调至所需温度，到达该温度后继续加热 0.5 h，以确保试样完全到达设定的温度。试验以 5℃ 为梯度，测试 10℃~65℃ 下含水率为 8%，压实度为 90%，高度为

20 mm 的试样的电阻率。

(3) 压实度与含水率影响。选用的钛电极尺寸为 5 mm×10 mm，进行不同压实度（80%，85%，90%，95%）及质量含水率（8%，11%，14%，17%，20%）下土样电阻率试验。

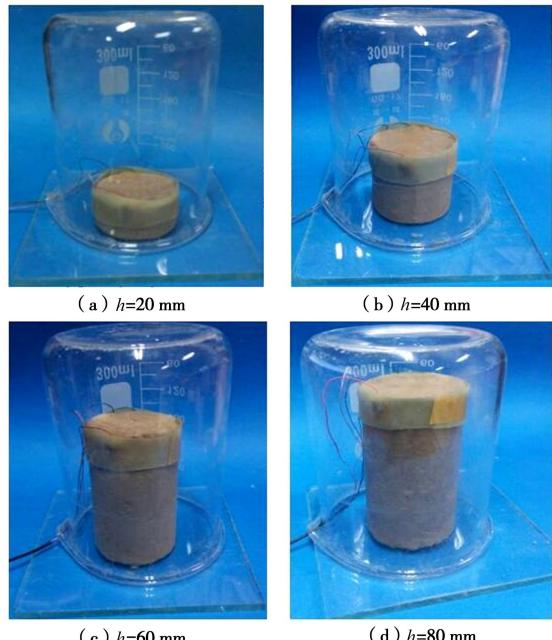


图 3 测试不同高度的试样端部电阻率测试

Fig. 3 Resistivity measurement at end of sample with different thicknesses

4 试验结果

4.1 电极尺寸对测试结果的影响

为研究范德堡法在土样电阻率测试中的合理电极尺寸，进行了电极尺寸及土样厚度对于土样电阻率测试值影响的试验。得到的试验结果如图 4 所示，可以看出，测得的电阻率值相差无几，都在 40 $\Omega \cdot m$ 左右，因此，无论钛电极的长度怎样变化，只要试样的高度与钛电极长度一致，该方法测试所得的电阻率值就为一恒定值，表明电极长度是决定试样厚度的控制因素。

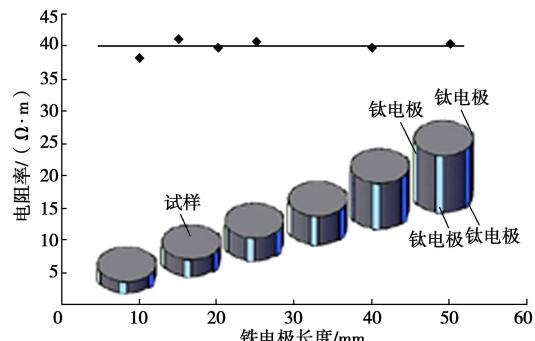


图 4 电极长度与试样等长的电阻率

Fig. 4 Resistivity vs. length of electrode with same sample thickness

图 5 给出了采用不同长度电极在测试高度为 80

mm 的试样端部电阻的试验结果, 可以看出当试样高度不变时, 同一试样测试电阻随着电极的长度的增加而增加, 电极长度与土样厚度相对比例影响着土中电流通道的分布变化, Jonathan^[34]及 Kasl 等^[35]研究结果表明 vdP 法测试电阻厚度与界面尺寸比值小于 0.5 ($c/a < 0.5$) 时, 测试电阻与试样厚度无关, 本试验中, 当电极片长度在 50 mm 时所测得的结果为 37.1 $\Omega \cdot m$, 结合图 4 的试验结果可以看出此时电阻率值基本上与单元厚度土样电阻接近, 因此考虑厚度为 20 mm, 即此时比值为 $20/39.1=0.51$, 其值与已有研究成果接近。

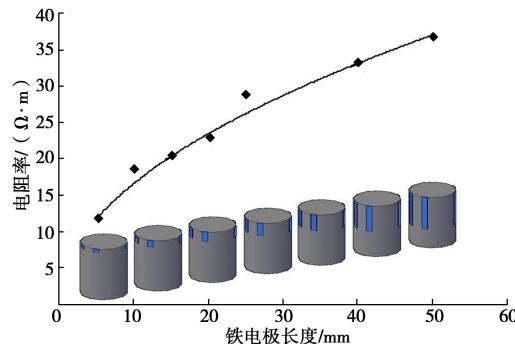


图 5 80 mm 试样端部电阻率随电极长度变化

Fig. 5 Variation of resistivity at end of 80 mm-sample with length of electrode

图 6 为不同高度试样其上端和下端 10 mm 处所测得的电阻率值的变化规律, 能够明显地看出当试样的高度变化时测试的电阻率也在发生变化, 即测试端部电阻率的值随着试样的高度在逐渐变小, 最后趋于稳定。在试样高度小于 40 mm 时高度对电阻率的变化影响较为明显, 当试样高度大于 40 mm 时, 高度的变化对端部电阻率的影响不再明显。造成这种现象主要原因为土样中电流场发生改变, 当试样的高度变化时, 类似于在测试土体上并联了一个电阻, 使得测得的电阻率减小, 同时电流场不会随高度无限扩展; 高度超过 40 mm 后, 由于层间电阻的影响, 高度对电阻率测试的影响就越来越小。

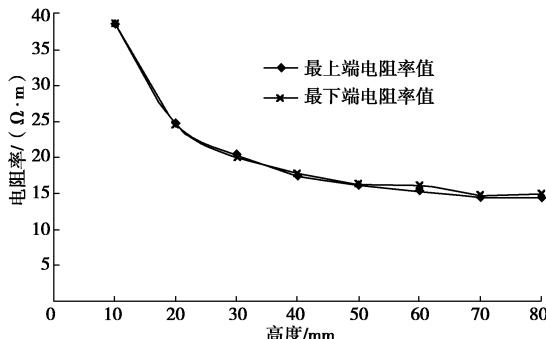


图 6 试样端部电阻率值随高度的变化

Fig. 6 Variation of resistivity with thickness of sample measured at end of sample

4.2 温度对电阻率的影响

土体试样里的水为含有酸、碱、盐的溶液, 当温度升高时, 一方面离子水化作用变小, 移动速度变快, 进而电阻率减小; 另一方面, 温度升高时, 溶液的黏度降低, 离子移动时受到的阻力减小, 使得溶液的电阻率变小。美国 Salinity 试验室研究了某一状态下土体的导电率与温度的关系并给出了相应的拟合公式^[8]:

$$\rho_t = f_t \rho_{25} \quad , \quad (2)$$

式中, f_t 为温度影响系数, Sheets 等^[36]提出如下的公式:

$$f_t = 0.4470 + 1.4034 e^{-t/26.815} \quad . \quad (3)$$

如图 7 可以看到随着温度的增加试样的电阻率在逐渐减小, 通过以 25°C 时的测试电阻率值为参考, 绘制了 Sheets 等预测曲线, 可以发现实测值很好的散落在该曲线周边, 表明土的电阻率测试可以采用该公式进行测试校正, 也验证了 vdP 法可以很好地测试土体的电阻率随温度变化特性。

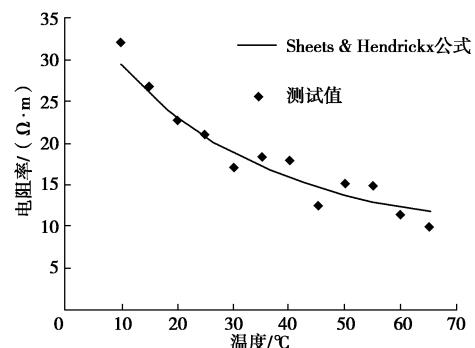


图 7 试样电阻率与温度的关系曲线

Fig. 7 Variation of resistivity with temperature

4.3 土体电阻率与压实度、含水率关系

为避免测试过程中土样含水率的变化, 测试时试样外用烧杯罩住, 且在烧杯与玻璃板的接触部位涂凡士林, 以防止试样水分蒸发。测试完电阻率后立刻用烘干法测得试样的含水率。测试结果如图 8 所示, 图中数值为 5 次平行试验的平均值, 可以看出, 随着含水率的增加电阻率减小, 研究者^[7]建立了体积含水率或饱和度与电阻率之间的关系, 质量含水率与电阻率之间关系多采用幂函数形式^[29], 也有研究者^[18]采用指数函数表示二者关系, 考虑基于电阻率确定含水率时公式推导的便利性, 本试验采用指数关系进行拟合, 拟合关系如表 2 所示, 其中 R^2 最高的为 0.983, 最低的为 0.967, 这说明某一状态下的土体的电阻率与含水率有着密切的关系。同时, 相对于电阻率 - 饱和度之间关系存在交叉现象的不足^[37], 质量含水率与电阻率之间曲线具有无互相交叉的优点, 即同一压实度下两者关系有唯一性的特点, 这一特性为电阻率法测试土

的含水率提供了依据。

图 9 给出了压实度对于电阻率的影响, 可以看出当含水率小于等于 14% 时, 压实度对试样电阻率的影响比较大, 即在这一含水率下随着压实度的提高电阻率在逐渐减小; 当含水率大于等于 17% 时, 压实度 k 从 0.85 到 0.95 变化时, 电阻率几乎没有太大的改变, 这是因为此时试样其内部水通道^[8]所占比例很高, 水通道路径占主导, 绝大部分电流沿此路径通过, 而压实度高低引起的固液通道及固固通道电流对试样的电阻率影响相对较小。

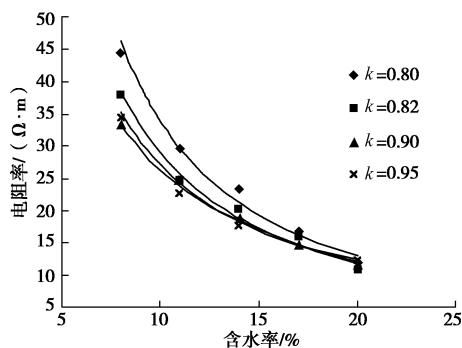


图 8 不同压实度土体电阻率与含水率关系

Fig. 8 Relationship between resistivity and water content under different compactions

表 2 拟合结果

Table 2 Fitting results

压实度/%	拟合公式	R^2
80	$\rho = 94.29e^{-0.11w}$	0.978
85	$\rho = 82.59e^{-0.11w}$	0.983
90	$\rho = 78.30e^{-0.10w}$	0.967
95	$\rho = 55.85e^{-0.09w}$	0.982

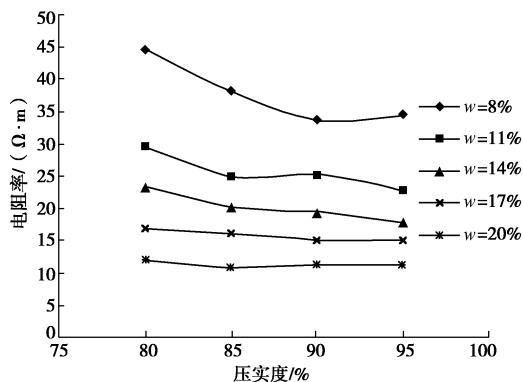


图 9 不同含水率下电阻率随压实度变化关系

Fig. 9 Variation of resistivity with compaction degree under different water contents

5 结语

本文基于范德堡法, 研发了一套土体电阻率测试

装置与方法, 本方法采用片状电极在土体表面进行测试, 与传统二电极法、四电极法相比, 具有不破坏土样、不影响土样其他力学试验的优点。通过研究电极长度、电极位置以及土样高度对电阻率的影响, 揭示了土样厚度(电极长度)的选取依据。对高度为 10 mm, 直径为 39.1 mm 的扁平单元土体试样的电阻率进行了测试, 研究了同一压实度下, 试样的电阻率与含水率服从指数关系, 以及指标参数随压实度变化规律, 从而达到通过电阻率测试三轴样中水分迁移规律目的。

参考文献:

- [1] RICHARD G, SÉGER M, BESSON A, et al. Electrical resistivity to assess soil properties[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2014.
- [2] QAZI W, MEMON M B. Effects of shear strength properties on electrical resistivity of compacted laterite soil: a conceptual model[C]// Malaysian Universities Conference on Engineering and Technology. Malaysia, 2015.
- [3] ASIF A R, ALI S S, NOREEN N, et al. Correlation of electrical resistivity of soil with geotechnical engineering parameters at Wattar area district Nowshera, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan[J]. Journal of Himalayan Earth Sciences, 2016, 49(1): 124 – 130.
- [4] WYCHOWANIAK D, ZAWADZKI Ł, LECH M. Application of column tests and electrical resistivity methods for leachate transport monitoring[J]. Annals of Warsaw University of Life Sciences Land Reclamation, 2015, 47(3): 237 – 247.
- [5] BRAKORENKO N N, KOROTCHENKO T V. Impact of petroleum products on soil composition and physical-chemical properties[J]. Earth and Environmental Science, 2016, 33(1): 012028.
- [6] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1028 – 1032. (HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-Jun. New method for testing contaminated soil—electrical resistivity method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1028 – 1032. (in Chinese))
- [7] ARCHIE G E. Electrical resistivity an aid in core-analysis interpretation[J]. Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 1942, 31(2): 350 – 366.
- [8] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/2/3): 11 – 43.
- [9] LEE J K, SHANG J Q, LEE J K, et al. Influencing factors on electrical conductivity of compacted kaolin clay[J].

- Geomechanics & Engineering, 2011, **3**(2): 131 – 151.
- [10] KIBRIA G, HOSSAIN M S. Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(12): 1520 – 1529.
- [11] ABIDIN M H Z, SAAD R, AHMAD F, et al. Correlation analysis between field electrical resistivity value (ERV) and basic geotechnical properties (BGP)[J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2014, **51**(3): 117 – 125.
- [12] ZHOU M, WANG J, CAI L, et al. Laboratory investigations on factors affecting soil electrical resistivity and the measurement[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, **51**(6): 5358 – 5365.
- [13] SEO S Y, HONG S S, LEE J S. Electrical resistivity of soils due to cyclic freezing and thawing[C]// ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions. Anchorage, 2015.
- [14] KANG M, LEE J S. Evaluation of the freezing-thawing effect in sand-silt mixtures using elastic waves and electrical resistivity[J]. Cold Regions Science & Technology, 2015, **113**: 1 – 11.
- [15] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 393 – 396. (YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 393 – 396. (in Chinese))
- [16] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率法的膨胀土吸水膨胀过程中结构变化定量研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1832 – 1839. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative research on microstructures of expansive soils during swelling using electrical resistivity measurements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1832 – 1839. (in Chinese))
- [17] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率的非饱和土基质吸力预测[J]. 岩土力学, 2010(3): 1003 – 1008. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Prediction of matric suction of unsaturated soil based on electrical resistivity[J]. Rock & Soil Mechanics, 2010(3): 1003 – 1008. (in Chinese))
- [18] 缪林昌, 严明良, 崔颖. 重塑膨胀土的电阻率特性测试研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **28**(9): 1413 – 1417. (MIAO Lin-chang, YAN Ming-liang, CUI Ying. Studies on electrical resistivity of remold expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **28**(9): 1413 – 1417. (in Chinese))
- [19] RAO B H, SINGH D N. Establishing soil-water characteristic curve of a fine-grained soil from electrical measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(5): 751 – 754.
- [20] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 电阻率法评价膨胀土改良的物化过程[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1711 – 1718. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Evaluation of physicochemical process in stabilized expansive soils using electrical resistivity method[J]. Rock & Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1711 – 1718. (in Chinese))
- [21] ASTM G57—06—2012. American society for testing and materials, standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method[S]. 2012.
- [22] ISLAM T, CHIK Z, MUSTAFA M M, et al. Modeling of electrical resistivity and maximum dry density in soil compaction measurement[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(67): 1299 – 1305.
- [23] SON Y, OH M, LEE S. Estimation of soil weathering degree using electrical resistivity[J]. Environmental Earth Sciences, 2009, **59**(6): 1319 – 1326.
- [24] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 83 – 87. (LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 83 – 87. (in Chinese))
- [25] DIAS C A. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1972, **77**(26): 4945 – 4956.
- [26] ZHUO W, LI M. A detector for plant electrical conductivity based on four-electrode method[J]. Sensor Letters, 2010, **8**(1): 122 – 127.
- [27] BURGER H R, BURGER D C. Exploration geophysics of the shallow subsurface[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992.
- [28] TELFORD W M, GLEDART L P, SHERIFF R E. Applied geophysics[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [29] 周仲华, 郑龙, 孙博. 土遗址墙体含水率与电阻率关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 4054 – 4058. (ZHOU Zhong-hua, ZHENG Long, SUN Bo. Research on relationships between water content and resistivity of earthen ruin walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2009, **28**(S2): 4054 - 4058. (in Chinese))
- [30] MUNO-ZCASTELBLANCO J, PEREIRA J M, DELAGE P, et al. The influence of changes in water content on the electrical resistivity of a natural unsaturated loess[J]. Astm Geotechnical Testing Journal, 2013, **35**(12/13): 1927 - 1934.
- [31] VAN DER P. Method of measuring specific resistivity and hall effect of diks of arbitrary shape[J]. Phil Res Rev, 1958(13): 1 - 9.
- [32] VAN DER P. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape[J]. Phil Tech Rev, 1958(20): 220 - 223.
- [33] NÁHLÍK J, KAŠPÁRKOVÁ I, FITL P. Study of quantitative influence of sample defects on measurements of resistivity of thin films using van der Pauw method[J]. Measurement, 2011,
- [34] JONATHAN D Weiss. A derivation of the van der Pauw formula from electrostatics[J]. Solid-State Electronics, 2008(52): 91 - 98.
- [35] KASL C, HOCH M J R. Effects of sample thickness on the van der Pauw technique for resistivity measurements[J]. Rev Sci Instrum, 2005(76): 33907 - 33911
- [36] SHEETS K R, HENDRICKX J M H. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction[J]. Water Resour Res, 1995, **31**: 2401 - 2409.
- [37] BAI W, KONG L, GUO A. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, **5**(5): 406 - 411.

第一届全国能源地下结构与工程学术研讨会

(一号通知·征文)

随着传统能源开采条件的复杂化以及新能源的广泛开发与应用，与能源相关的岩土工程问题不断涌现出来；如何解决能源地下结构与工程问题让广大工程研究人员和工程技术人员面临前所未有的机遇与挑战。为攻克能源岩土相关技术难题，中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会筹建能源地下结构与工程专业委员会，北京中岩大地工程技术有限公司和清华大学联合主编中华人民共和国行业标准《桩基地热能利用技术规程》（暂定名）。拟于2017年8月底召开第一届全国能源地下结构与工程学术研讨会，对我国近年来能源地下结构与工程领域的应用经验和最新研究成果进行广泛的学术交流。同时，召开中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会能源地下结构与工程专业委员会成立大会、中华人民共和国行业标准《桩基地热能利用技术规程》（暂定名）编制审查会。

主办单位：中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会；能源地下结构与工程专业委员会。

承办单位：清华大学土木工程系。

协办单位：河海大学土木与交通学院；重庆大学土木工程学院。

会议议题：能源地下结构与工程（包括桩基础、地下连续墙、隧道、筏板、基坑支挡、锚杆以及路基路面结构等）；钻

孔埋管技术与能源地下结构相互影响；深层地热井与井筒结构技术；机场跑道、公路桥面和隧道等防冻除冰技术；能源地下工程中的THM多场耦合问题；其他与新能源利用相关的岩土工程问题。

论文格式要求：摘要论文一般不超过2页A4纸版面（含图表与公式）。本次会议录用摘要论文将出版摘要论文集，来稿请严格按照《岩土工程学报》的论文模板进行排版。邮寄一份电子文本，论文中请务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。

重要日期：2017年4月30日前提交摘要论文；2017年5月31日前通知作者是否录用；2017年6月30日前提交修改后的论文；2017年8月底会议召开。

论文投稿及会务组联系方式：河海大学土木与交通学院孔纲强（注明“第一届全国能源地下结构与工程学术会议”）；地址：江苏省南京市西康路1号河海大学土木与交通学院；邮编210098；联系电话025-83786834/15205168312；传真：025-83786834；电子邮箱：Energy_Geotechnics@163.com。清华大学土木工程系郭红仙（注明“第一届全国能源地下结构与工程学术会议”）；地址北京清华大学土木工程系；邮编100084；联系电话010-62782184；电子邮箱：guohx@tsinghua.edu.cn。

（中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会
能源地下结构与工程专业委员会 供稿）