

DOI: 10.11779/CJGE202208007

# 排水过程三轴试样含水率分布演化规律研究

马德良<sup>1, 2</sup>, 谢一飞<sup>1, 2</sup>, 冯怀平<sup>\*1, 2</sup>, 李腾<sup>1, 2</sup>, 常建梅<sup>1, 2</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 三轴试验过程中试样含水率分布实时测试对吸力平衡判断、剪切速率确定和湿化变形等研究具有重要意义。通过扩展范德堡电阻率测试理论(vdP), 提出了柱状土体含水率测试理论; 在此基础上, 研发一种厚度仅为 0.1 mm 的柔性印刷电极及配套的范德堡法集成测试装置。通过设计围压与温度敏感性因素试验, 验证装置兼容性和可靠性。最后开展了恒压状态下的三轴干湿循环试验, 并对试验过程中试样分层电阻率进行监测。试验结果表明, 本套试验装置需要至少 120 kPa 静围压预压, 以保证电极与试样完全贴合; 同时试验全程静围压不低于 20 kPa 以保持电极紧密贴合。温度对电阻率测试精度具有一定的影响, Campbell 模型可以有效修正温度带来的测试误差。浸水过程中, 试样电阻率从下至上依次降低; 排水过程中, 试样电阻率由顶到底逐渐降低; 最后提出了脱湿过程的试样分层含水率计算方法并且分析了含水率分布演化规律。

**关键词:** 非饱和土; 含水率分布; 范德堡法; 三轴试样

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)08-1425-09

作者简介: 马德良(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土测量设备的研发工作。E-mail: madeliang@stdu.edu.cn。

## Development of moisture content distribution of triaxial samples during drying process

MA De-liang<sup>1, 2</sup>, XIE Yi-fei<sup>1, 2</sup>, FENG Huai-ping<sup>1, 2</sup>, LI Teng<sup>1, 2</sup>, CHANG Jian-mei<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Mechanical Behavior Evolution and Control of Traffic Engineering Structures in Hebei, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The real-time measurement of moisture content distribution in the triaxial tests is significant to suction balance, shear rate and wetting deformation. The principle of water content tests on triaxial samples is proposed by extending van der Pauw (vdP) resistivity theory. Moreover, the flexible printing electrode (FPE) with 0.1 mm in thickness and the vdP method device are developed. The compatibility and reliability of the device are verified through the sensitivity factor tests such as net confining pressure and temperature. Finally, the triaxial drying-wetting cycle tests under constant pressure are carried out. At the same time, the layered resistivity is monitored. The test results show that the test device needs the preloading of net confining pressure of at least 120 kPa to ensure the complete cover between the FPE and the samples, and the net confining pressure shall be more than 20 kPa to ensure the cover status in the tests. The temperature has a certain influence on the results of resistivity tests, and the Campbell model can effectively correct the temperature-introduced errors. In the process of moisture wetting, the resistivity decreasing from bottom to top can be observed dramatically. In the process of drying, the resistivity decreases gradually from top to bottom. Finally, the method for calculating the layered moisture content during drying process is proposed, and the evolution law of moisture content distribution is analyzed.

**Key words:** unsaturated soil; moisture content distribution; van der Pauw method; triaxial sample

## 0 引言

非饱和土在含水率或基质吸力发生变化时, 其强度、变形和渗透性将随之发生变化<sup>[1]</sup>。非饱和三轴试验是研究土体强度与变形, 揭示非饱和土力学特性的重要手段。近年来, 基于轴平移技术的非饱和三轴试

验主要通过渗透平衡的方法设定吸力值<sup>[1-3]</sup>。然而, 受

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478279); 中央引导地方项目(216Z1805G)

收稿日期: 2022-01-05

\*通信作者(E-mail: fenghuiping@stdu.edu.cn)

陶土板渗透系数影响, 试样气水平衡耗时较长, 这导致在非饱和三轴剪切试验中, 均采用较低的轴向剪切速率<sup>[4-8]</sup>, 使试样重新渗透平衡, 以保证试样基质吸力均匀且为设定值。同时, 吸力平衡判断标准与剪切速率通常依赖经验参考值和类似试验参考, 而掌握压力室内试样的含水率分布情况是判断基质吸力平衡的重要依据。另一方面, 由于难以直接获取水分分布和平衡状态, 如在非饱和土动三轴试验中实时含水率测试值可靠性降低。此外, 研究细粒土湿化问题主要集中在湿化变形的计算方法<sup>[9-10]</sup>、强度劣化影响因素<sup>[11-12]</sup>等方面, 由于缺少试样分层含水率无损测量装置, 因此在力-水耦合作用下, 湿化行为的精细化研究较为困难。文献[13]指出现有设备在荷载与浸水的联合作用下, 测量非饱和土中湿度、密度以及对应吸力的连续变化过程存在困难, 而这种测定又是揭示非饱和土力学特性规律所必需的。因此, 研制一种三轴压力室内试样分层含水率测试装置, 对非饱和土三轴试验具有重要意义。

针对三轴压力室内试样含水率监测问题, 众多学者行了广泛探索。Su 等<sup>[14]</sup>将传统的 TDR 传感器小型化, 用以分层监测三轴试样含水率变化, 但该仪器需要插入土体, 会破坏试样完整性。Munoz-Castelblanco 等<sup>[15]</sup>使用改进的电阻率探头, 实现了狭小空间试样含水率的测量, 但测量方法对测试范围的定义还不够明确, 难以分层测试三轴试样含水率。Chen 等<sup>[16]</sup>对三轴仪进行了改进, 将二相电极法应用到三轴试验中, 但其所测电阻率为试样平均电阻率, 无法做到分层监测。方祥位等<sup>[17]</sup>利用 CT-多功能土工三轴仪研究了 Q<sub>2</sub> 黄土三轴浸水过程, 并从 CT 图像直观地观察了水自底部逐渐向上渗入土体的全过程。刘奉银等<sup>[13]</sup>开发了一种新型非饱和土  $\gamma$  射线土工三轴仪, 研究了非饱和土在荷载、水以及二者的耦合作用条件下的力学性状, 揭示了水在荷载作用下的传递规律。冯怀平等<sup>[18]</sup>将范德堡法引入到非饱和土电阻率测试中, 实现了狭小空间中试样分层含水率连续无损监测, 但未能在静三轴压力室内实现精细化电极布置。基于此原理, 杨志浩等<sup>[19]</sup>研制出一套基于 GDS 动三轴仪的非饱和试样含水率分布规律测试系统, 但未考虑范德堡法非扁平样的几何误差<sup>[20]</sup>。

本文基于改进范德堡法, 研发了一种厚度仅为 0.1 mm 的柔性印刷电极, 以实现对三轴压力室内试样分层含水率的连续、无损监测, 并研制了与之配套的 vdP 法测试装置, 同时研究了压力室围压与实验室温度波动对电阻率测试结果的影响。最后使用非饱和应力路径三轴仪, 进行了基质吸力控制下的干湿循环试验, 揭示了试样分层电阻率随时间的演变规律, 进而研究

了基质吸力平衡过程中试样水分迁移规律。

## 1 扩展范德堡法测试原理

传统的范德堡法测试结果为整体电阻率, 这就导致其难以应用在三轴试样的多层电阻率测试中。因此, 王志鹏<sup>[20]</sup>基于电阻率试验, 提出了“高度效应影响线”, 初步给出了多层电阻率测试方法。吴忠学<sup>[21]</sup>利用 COMSOL 数值方法, 提出了考虑厚度效应的范德堡法公式, 突破了试样厚度的局限性, 验证了王志鹏<sup>[20]</sup>所提出的影响线。但并未给出单层范德堡法的测试范围。

为了确定柔性印刷电极布设层数与位置, 需要确定圆柱状范德堡法测试范围。利用 COMSOL 建立直径为 39.1 mm, 两边可以延伸的仿真模型, 按照范德堡法在两电极之间加载 1mA 的交流电, 另外两点测量试样电压, 试样电压随试样高度的变化情况如图 1 所示。其中,  $\rho_0$  为试样电阻率,  $\rho_{\text{test}}$  为范德堡法测量的电阻率,  $D$  为试样直径(39.1 mm),  $H$  为试样厚度。 $\rho_{\text{test}}$  的表达式为

$$\rho_{\text{test}} = \frac{V_{\text{sym}}}{I_0} \frac{c\pi}{\ln 2} , \quad (1)$$

式中,  $V_{\text{sym}}$  为测量得到的电压,  $I_0$  为施加的电流,  $c$  为电极片的高度。具体方法依据文献[18]进行计算。

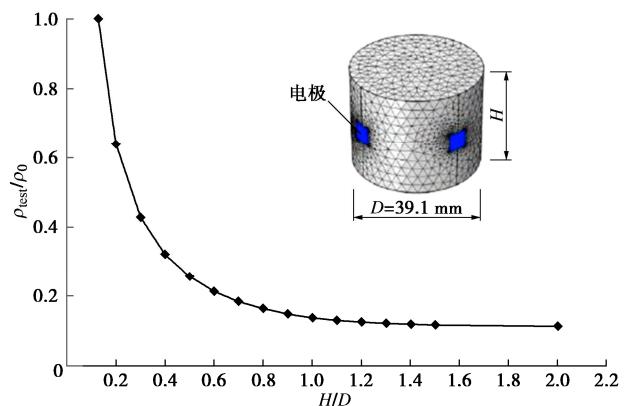


图 1 电阻率测量误差随高度变化曲线

Fig. 1 Measurement errors of resistivity with various heights

从图 1 中可以看出, 单层范德堡法测试范围主要在电极上下 0.5D 内, 即电极上下 2 cm 内。由于本文试验使用的试样为直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的标准三轴试样, 因此, 柔性印刷电极布设 3 层, 分别位于试样 20, 40, 60 mm 高度处。

## 2 试验试样及装置

### 2.1 试样制备

试验用土取自山西省 Q<sub>4</sub> 黄土, 基本物理性质如表 1 所示。级配曲线如图 2 所示。

表1 土的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of soil

| 土颗粒相对质量密度 | 液限 /% | 塑限 /% | 最优含水率 /% | 最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|-----------|-------|-------|----------|------------------------------|
| 2.71      | 24.3  | 15.8  | 12.4     | 1.78                         |

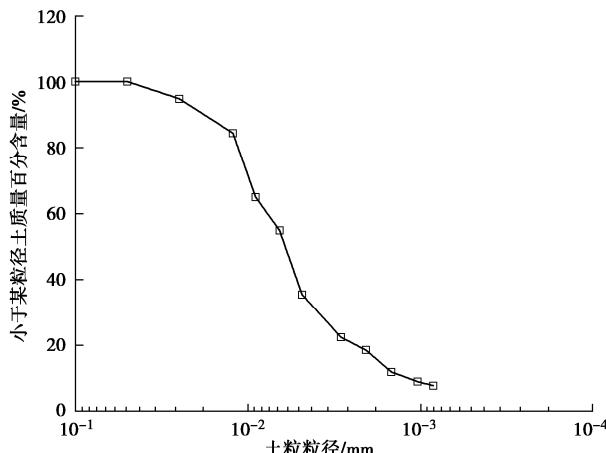


图2 粒径级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves

本试验采用的试样为直径 39.1 mm, 高度为 80 mm 的标准三轴试样。配置含水率为 12% 的试样, 使用密封袋密封后, 放入保湿器中静置 48 h, 使试样水分均匀。按照《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》要求制备 90% 压实度的试样, 并使用保鲜膜密封, 静置 48 h, 使试样内部水分充分均衡。

## 2.2 试验装置

采用英国 GDS 公司生产的非饱和土应力路径三轴仪, 并在其基础上加装电阻率测试装置, 改进后的仪器示意图如图 3 所示。其中, 电阻率测试装置由柔性印刷电极及与之配套的 vdP 法测试装置组成。

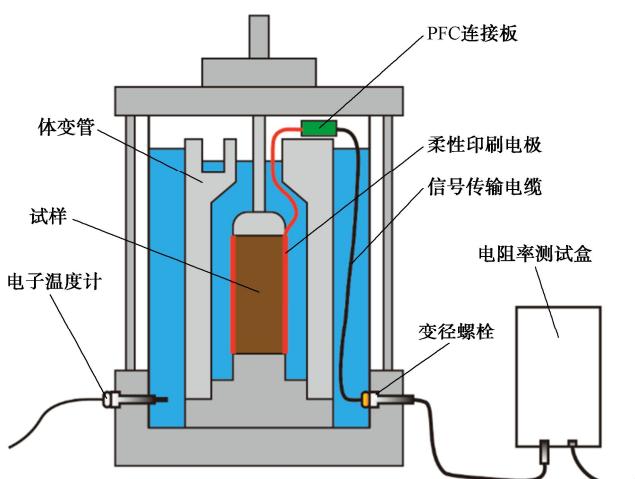


图3 非饱和三轴仪改装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modified unsaturated triaxial device

图 4 为本次试验使用的柔性印刷电路板实物图。电路板厚度为 0.1 mm, 其主体部分大小为 123 mm×80 mm, 略大于三轴试样侧面积尺寸 (122.8 mm×80 mm), 尾部为插头, 可与 vdP 法测试装置相连接。其表面布置有 3 层共计 12 个大小为 5 mm×5 mm 的惰性金属电极。主体部分包裹在试样侧面时, 3 层电极分别分布于试样 20, 40, 60 mm 高度处。为了精确将柔性印刷电路板精准地放置在试样与三轴膜之间, 先将柔性印刷电路板用胶带固定在三轴膜固定位置, 然后用洗耳球抽空装样磨具与三轴模之间空气, 最后将试样放置在三轴膜内。

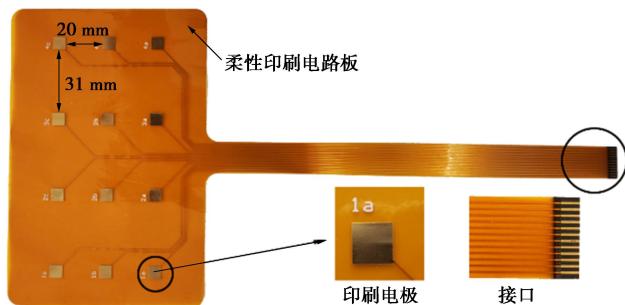


图4 柔性印刷电极

Fig. 4 Flexible printing electrode

vdP 法测试系统主要包括电阻率测试盒、电子温度计、测试传输电缆和计算机软件程序。

电阻率测试盒内置恒流源、电压采集模块、电路切换模块、通信模块等。该装置的实物图如图 5 所示。由于交流电可有效降低电阻率测试过程中的极化现象<sup>[22-23]</sup>, 同时 Zhang 等<sup>[23]</sup>指出, 在 1~100 kHz 下电阻率特性保持恒定。因此, 测试盒采用频率为 1 kHz 的交流电测试试样电阻率。



图5 电阻率测试盒

Fig. 5 Integration resistivity device

电子温度计为 PT1000A 型铂热电阻, 温度测试范围为 -200~850°C, 测试精度为 0.15°C。温度计通过变径螺栓安装在三轴仪上, 可测量压力室内水温, 用于

修正试样电阻率因温度改变产生的误差。

测试传输电缆通过三轴仪外壁的变径螺栓进入压力室中, 末端为 PFC 接线板, 可与印刷电极尾部 PFC 插头连接, 实物如图 6 所示。



图 6 印刷电极与电缆连接

Fig. 6 PFC connection between FPE and cable

### 3 试验方案

#### 3.1 装置敏感因素试验

为了验证装置的适应性、稳定性, 分别进行净围压试验与温度敏感性试验。为了避免试验过程中底座陶土板水分向试样迁移, 导致试样电阻率发生变化, 试验开始前, 使用透明胶带将底座密封, 不排水边界, 试样的上端为气压控制边界。

(1) 围压影响试验。如图 7 所示, 首先将试样净围压加载到 200 kPa, 然后卸载, 以研究净围压变化对电极片接触的影响。待每级围压加载稳定后, 对试样每层电阻率进行测试。

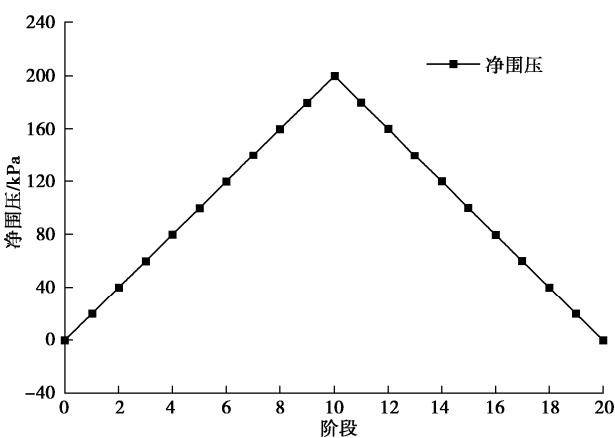


图 7 净围压加载路径

Fig. 7 Loading paths of net confining pressure

(2) 环境温度影响试验。净围压试验结束后, 依据试验结果, 将试样净围压调整到 50 kPa, 通过室内的空调控制室温升降, 模拟室内温度变化对试样电

阻率测试的影响。温度敏感性试验包含 3 个阶段, 每当三轴仪内温度变化 0.5℃时, 测试试样电阻率。具体方案如下: ①三轴仪内温度降低到 20.5℃后, 立即关闭空调, 室内温度自然升高。②三轴仪内温度升高到 27.5℃后, 立即开启空调, 降低室内温度。③三轴仪内温度降低到 20.5℃后, 保持空调状态不变, 12 h 后关闭, 使实验室自然升温。

#### 3.2 干湿循环试验

干湿循环试验通过控制试样基质吸力实现(试样下端水压为 0 kPa, 顶端为气压控制边界), 共进行两次干湿循环, 如图 8 所示。为保证印刷电极与试样接触良好, 试样净围压设为 50 kPa。试验所用基质吸力为 0, 250 kPa。本文使用的平衡判断标准为: 试样各层电阻率在 48 h 内变化量小于各阶段初始值的 2%。

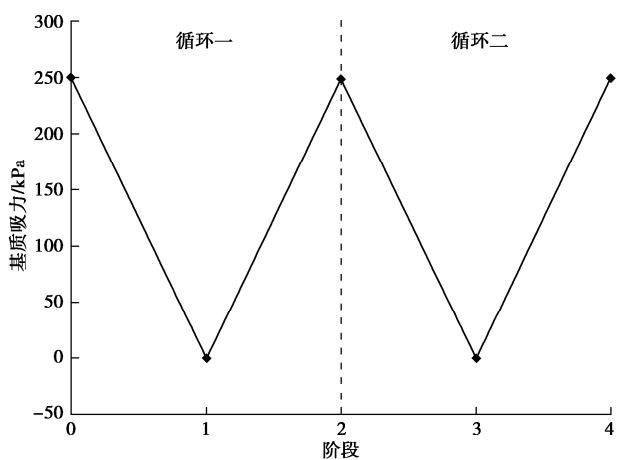


图 8 基质吸力调整示意图

Fig. 8 Schematic diagram of matrix suction

控制试样的初始基质吸力为 250 kPa, 试验开始前, 施加 100 kPa 净围压, 250 kPa 基质吸力, 使试样充分变形, 直至连续 2 h 内体变小于 0.01 cm<sup>3</sup>, 且试样各层电阻率在 48 h 内变化小于 2%。此时, 试样内部基质吸力已达到平衡状态, 开始进行基质吸力循环试验。

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 敏感因素试验结果及分析

##### (1) 静围压对电阻率测量的影响

图 9 为净围压、分层电阻率与体变随时间变化曲线。从图 9 中可以看出, 在加压阶段, 各层电阻率随着净围压的升高先快速降低, 后逐渐趋于稳定; 在降压阶段, 随着净围压的降低, 各层电阻率并未出现明显的变化, 但当净围压降低到 20 kPa 后, 各层电阻率有 5%左右的回升。

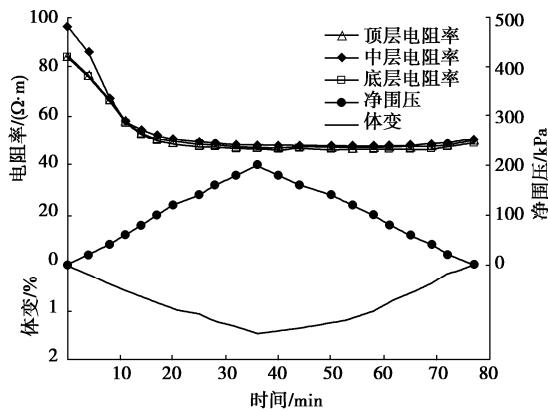


图 9 体变、净围压与电阻率随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of resistivity, volumetric change and net confining pressure with time

这是由于柔性印刷电极具有一定的强度, 仅靠橡胶模的弹性无法保证电极与试样完全接触, 随着净围压的升高, 电极逐渐被压到试样表面, 导致电阻率降低。当净围压升高到 120 kPa 后, 印刷电极变形, 电极与试样完全接触, 电阻率不再随净围压发生明显变化。但当净围压降到 20 kPa 以下后, 印刷电极略微回弹, 导致电阻率略微上升。图 10 为试验结束后的试样, 可以看出, 电极可完全包裹在试样侧面。因此, 柔性印刷电极在使用时需要经过不低于 120 kPa 的应力预压, 且在使用过程中, 须保持净围压不低于 20 kPa。



图 10 试验结束后柔性电极状态

Fig. 10 FPE status at end of tests

由图 9 可以看出, 当试样加卸载后, 试样体变经历了先增加后减小的过程, 最终卸载至最初状态时, 试样发生了较小的体变。因此, 验证了压力室内的水未进入到试样中, 装置仍然具有良好的密封性。

## (2) 温度对电阻率测量的影响

图 11 为试验过程中各阶段温度与中层电阻率随时间变化曲线。从图 11 可以看出, 电阻率随着温度升高而降低, 与韩立华等<sup>[24]</sup>、周蜜等<sup>[25]</sup>的研究结果相符合。但值得注意的是, 在每个阶段刚开始时, 电阻率变化明显滞后于温度变化。这是由于所测温度为三轴压力室内水的温度, 并非试样温度, 而压力室内的水

被体变管分割为内室外室两部分, 体变管导热性能较差, 导致内室温度变化滞后于外室。同时无损测试试验平均温度也较为困难。

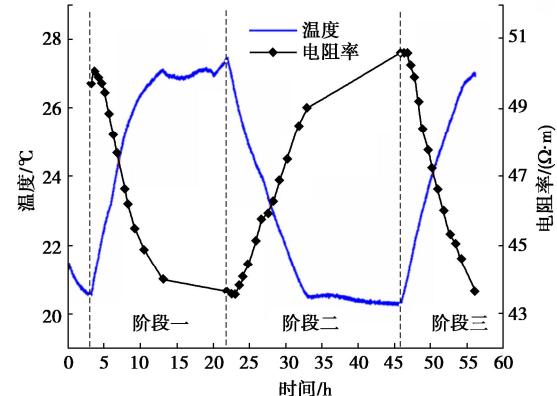


图 11 电阻率与温度变化曲线

Fig. 11 Curves of resistivity with various temperatures

本文基于 Campbell 模型<sup>[26]</sup>, 添加了温度延时参数  $\Delta t$ , 对试样电阻率与温度进行拟合, 得到相应的拟合曲线。Campbell 模型公式如下:

$$\rho_T = \frac{\rho_{25}}{1 + \alpha[(T + \Delta t) - 25]} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\rho_{25}$ ,  $\rho_T$  分别为 25°C 和任意  $T$ °C 时土体的电阻率,  $\alpha$  为经验系数,  $\Delta t$  为 1 h 前测得的外室水温与当前水温之差。

图 12 为减去温度延时参数后的 Campbell 模型曲线。从图 12 中可以看出, 修正后的温度与电阻率拟合度较高, 因此可用 Campbell 模型校正温度引起的测试误差。

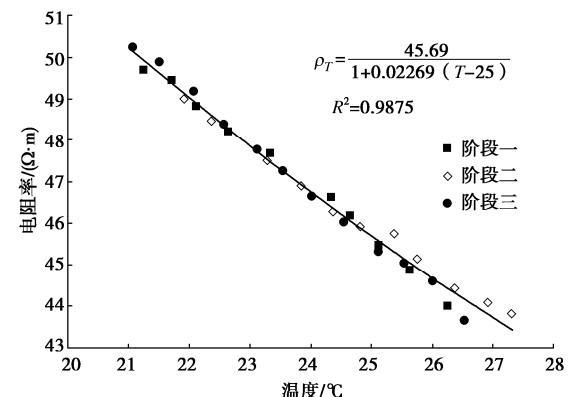


图 12 电阻率与修正后温度拟合

Fig. 12 Fitting results between resistivity and correction temperature

## 4.2 干湿循环试验的电阻率结果

为消除试验室温度变化对电阻率测试的影响, 依据 4.1 节中试验结果, 使用式(2)将测得的电阻率校正到 25°C 下的电阻率数值。图 13 为第一次干湿循环过程中, 电阻率与初始值之比随时间变化曲线, 用以

描述电阻率随时间的变化趋势。

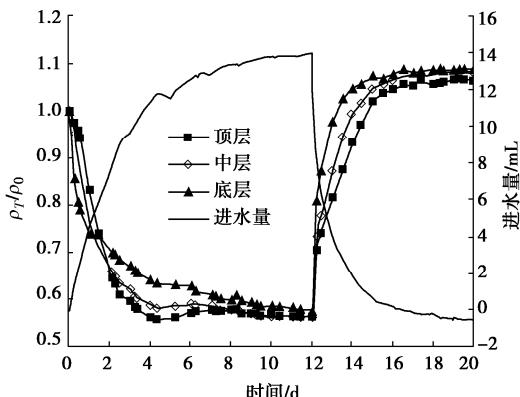


图 13 循环一中各层电阻率变化趋势

Fig. 13 Tendency of resistivity of each layer in cycle I

从图 13 中可以看出,随着试样进水量的增加,电阻率整体呈下降趋势,并随着进水速率的降低逐渐趋于平稳。在吸湿阶段,底层电阻率首先降低,中层与顶层随后降低,但降低幅度明显小于底层;在脱湿阶段,三层电阻率几乎同时升高,但底层升高幅度最大,中层次之,顶层最小。这表明,在吸湿阶段,试样底层优先进水,电阻率快速降低,在基质吸力作用下,底层水分同时向上迁移,使中层与顶层电阻率下降;在脱湿阶段,试样整体排水,但底层排水速率高于中层与顶层,导致电阻率升高幅度较大。

第 2 天时,顶层与中层电阻率降低幅度逐渐超过底层,变为顶层降低幅度最大,中层次之,底层最低,且随着进水的增加,差距在不断增大。其原因是在基质吸力作用下,水分由底层进入试样中,试样内部的一些离子溶入孔隙水中<sup>[27]</sup>,并随着水分向上迁移,使试样底层离子浓度低于顶层,导致顶层电阻率降低幅度大于底层。为方便下文分析,该现象简称为离子迁移现象。

第 4 天时,3 层电阻率比值的差距开始逐渐减小;第 8 天后,顶层与中层比值曲线重合。当水中离子浓度不均衡时,离子会向低浓度区域扩散,出现离子扩散现象。由于前期试样饱和度较低,孔隙水连通性较差,限制离子迁移速度。但第 4 天后,试样平均饱和度超过 80%,试样中大部分孔隙水已经连通,且随着进水速率不断降低,离子扩散速度超过离子迁移速率,使电阻率差值逐渐减小。同时,随着吸力平衡的进行,试样内部水分趋于均衡,因此电阻率趋于一致。最终顶层与中层电阻率比值曲线相重合,表明此时试样中离子浓度达到平衡。

第 8 天后试样离子已达到平衡,但底层电阻率比值并未与其他两层相重合,而是明显高于其他两层。由图 1 可知,虽然电极主要测试范围在电极上下 2 cm 的范围内,但电极上下 2 cm 之外的部分仍然会对测试

结果产生一定影响。本试验中,试样下部为镶有陶土板的金属底座,电阻率为固定值,当试样电阻率下降时,底座电阻率不变,可以近似理解为试样电阻率不变,底座电阻率升高,因此底层电阻率比值偏高。

综上所述,由于吸湿过程中可能同时存在离子迁移与离子扩散现象,且非饱和土中离子迁移与扩散是一个多项耦合过程,导致仅通过电阻率计算吸湿过程中试样分层含水率变化会出现较大误差。从图 13 中可以发现,在脱湿阶段电阻率稳定后,3 层电阻率比值相差较小。可以看出在脱湿过程中,由于孔隙水中离子浓度已达到均衡,且随着水分排出,离子浓度不再产生变化,表明离子迁移现象并不明显。因此,可通过电阻率计算排水过程中试样分层含水率变化。

#### 4.3 排水过程的含水率分布规律

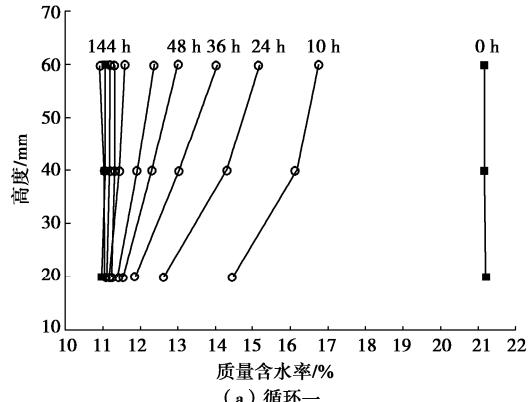
本文含水率计算公式参考 Melo 等<sup>[28]</sup>使用的指数模型:

$$w = a \exp(-b\rho) \quad , \quad (3)$$

式中,  $w$  为试样质量含水率,  $a$ ,  $b$  为与土体性质有关的拟合参数,  $\rho$  为试样电阻率。

为了降低离子迁移的影响,将各层试样的初始与平衡时含水率(GDS 排水量和烘干法含水率相加)以及与之对应的电阻率代入式(2)中,求解出各层各阶段对应的  $a$ ,  $b$ ; 将各阶段各层的  $a$ ,  $b$  分别代入式(2)中,获得各阶段各层的含水率计算公式; 再将各阶段各层测得的视电阻率代入相应的含水率计算公式中,获得土样不同时刻分层含水率。

图 14(a), (b) 分别为两次脱湿过程中,试样含水率沿高度分布图。图中相邻两条曲线的时间差为 12 h。由图 14 可知,脱湿过程中,试样整体同时排水,但底层含水率降低程度最大,中层次之,顶层最小。非饱和土中,试样渗透性随含水率的减小而降低<sup>[29-30]</sup>。施加 250 kPa 基质吸力后,试样开始排水,但试样排水界面在试样底部,与陶土板接触部分的试样水分快速排出,含水率迅速减小,渗透性能降低,导致水分迁移速率下降,阻碍上部水分向下迁移。从而导致试样顶部含水率高于底部。



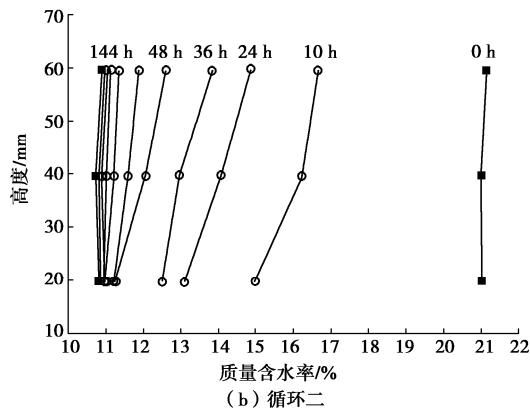


图 14 试样含水率沿高度分布图

Fig. 14 Distribution of moisture content along height

图 15 为两次脱湿过程中, 试样分层含水率随时间变化图。由图 15 可以看出, 相较于第一次脱湿过程, 第二次脱湿过程中 3 层试样含水率差距明显降低, 底层含水率略微增大, 顶层含水率略微减小。许健等<sup>[31]</sup>指出, 干湿循环会提高试样渗透性。在经过一个干湿循环后, 试样渗透性得到提高, 导致上层水分向下迁移的速度提高, 使顶层含水率减小, 底层含水率略微增大。该现象也同时证明了底层含水率小于顶层是由于底层快速排水, 渗透性降低, 阻碍上层水分向下迁移。

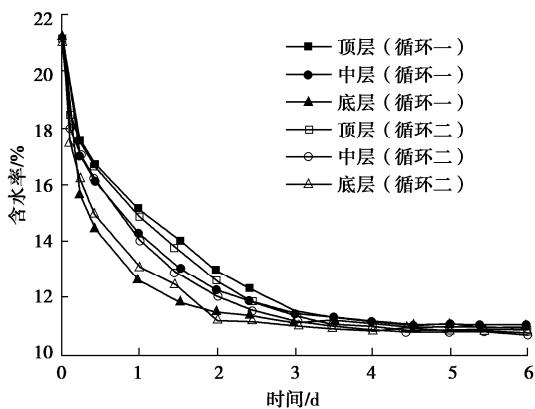


图 15 排水试验含水率分布随时间变化

Fig. 15 Distribution of moisture content during drying process

## 5 结 论

(1) 本文研发了一套三轴压力室内试样分层电阻率测试装置, 可测量试样局部电阻率变化。敏感性因素试验发现需要 120 kPa 的净围压预压, 以保证电极片与试样充分接触, 且在使用过程中需保持净围压在 20 kPa 以上, 以保持柔性印刷电极与试样接触状态稳定。温度对试验测试存在影响, 测试过程应保持温度相对稳定, 也可以使用 Campbell 模型校正以保证测试精度。

(2) 本文提出了三轴试样的排水过程分层含水

率测量方法。通过干湿循环试验, 发现吸湿阶段试样中可能存在离子迁移与离子扩散现象。在脱湿阶段, 离子迁移与扩散现象不明显, 对试样分层含水率计算影响较小。

(3) 干湿循环过程水分迁移表现为: 吸湿阶段, 底层优先进水, 并在吸力作用下立即向上迁移脱湿阶段, 由于排水边界在试样底面, 底层水分优先排出, 饱和度降低, 渗透性能下降, 阻碍上层水分向下迁移, 导致顶层含水率高于底层, 直至吸力达到平衡, 试样水分分布重新均匀。

## 参 考 文 献:

- [1] 叶云雪, 邹维列, 韩仲, 等. 非饱和土孔隙比与基质吸力关系的通用模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 927–933. (YE Yun-xue, ZOU Wei-lie, HAN Zhong, et al. General model for relationship between void ratio and matric suction in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 927–933. (in Chinese))
- [2] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 干湿循环条件下粉质黏土在循环荷载作用下的动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 425–432. (LIU Wen-hua, YANG Qing, TANG Xiao-wei, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of silt clay subjected to drying-wetting cycles under cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 425–432. (in Chinese))
- [3] CAO Z G, ZHANG Q, CAI Y Q, et al. The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials[J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105775.
- [4] 张俊然, 孙德安, 姜彤. 吸力历史对非饱和弱膨胀土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3094–3100, 3120. (ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated weakly-expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3094–3100, 3120. (in Chinese))
- [5] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1064–1070. (ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1064–1070. (in Chinese))
- [6] 郭楠, 陈正汉, 高登辉, 等. 加卸载条件下吸力对黄土变形特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 735–742. (GUO Nan, CHEN Zheng-han, GAO Deng-hui, et al. Experimental research on influences of suction on

- deformation characteristics of loess under unloading-reloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4): 735 – 742. (in Chinese))
- [7] 高登辉, 陈正汉, 郭楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 736 – 744. (GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, GUO Nan, et al. The influence of dry density and matric suction on the deformation and the strength characteristics of the remolded unsaturated loess soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 736 – 744. (in Chinese))
- [8] 王欢, 陈群, 王红鑫, 等. 不同压实度和基质吸力的粉煤灰三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊 1): 224 – 230. (WANG Huan, CHEN Qun, WANG Hong-xin, et al. Triaxial tests on fly ash with different compaction and matric suction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 224 – 230. (in Chinese))
- [9] 高帅, 骆亚生, 胡海军, 等. 非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1313 – 1318. (GAO Shuai, LUO Ya-sheng, HU Hai-jun, et al. Triaxial tests on water immersion of unsaturated and undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1313 – 1318. (in Chinese))
- [10] 常建梅, 尹荣玉, 王志鹏, 等. 考虑湿化的重载铁路粉黏土基床土体骨干曲线研究[J]. 铁道学报, 2020, **42**(7): 141 – 147. (CHANG Jian-mei, YIN Rong-yu, WANG Zhi-peng, et al. Study on backbone curve of silty clay in heavy-haul railway subgrade considering wetting[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, **42**(7): 141 – 147. (in Chinese))
- [11] 冯怀平, 宋慧来, 常建梅, 等. 浸水作用下重载铁路基床动回弹模量衰减规律[J]. 中国铁道科学, 2020, **41**(3): 21 – 30. (FENG Huai-ping, SONG Hui-lai, CHANG Jian-mei, et al. Attenuation law of dynamic resilient modulus of subgrade bed for heavy haul railway under water immersion[J]. China Railway Science, 2020, **41**(3): 21 – 30. (in Chinese))
- [12] 郭楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 重塑黄土的湿化变形规律及细观结构演化特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, **54**(1): 73 – 81, 90. (GUO Nan, CHEN Zheng-han, YANG Xiao-hui, et al. Research on wetting-deformation regularity and microstructure evolution characteristics of remoulded loess in triaxial soaking tests[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, **54**(1): 73 – 81, 90. (in Chinese))
- [13] 刘奉银, 谢定义, 俞茂宏. 一种新型非饱和土  $\gamma$  射线土工三轴仪[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(5): 548 – 551. (LIU Feng-yin, XIE Ding-yi, YU Mao-hong. A new type of triaxial apparatus with  $\gamma$  rays for unsaturated soils test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(5): 548 – 551. (in Chinese))
- [14] SU W, CUI Y J, QIN P J, et al. Application of instantaneous profile method to determine the hydraulic conductivity of unsaturated natural stiff clay[J]. Engineering Geology, 2018, **243**: 111 – 117.
- [15] MUÑOZ-CASTELBLANCO J A, DELAGE P, PEREIRA J M, et al. On-sample water content measurement for a complete local monitoring in triaxial testing of unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2012, **62**(7): 595 – 604.
- [16] CHEN Y L, WEI Z A, IRFAN M, et al. Laboratory investigation of the relationship between electrical resistivity and geotechnical properties of phosphate tailings[J]. Measurement, 2018, **126**: 289 – 298.
- [17] 方祥位, 申春妮, 陈正汉, 等. 原状  $Q_2$  黄土 CT-三轴浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(10): 98 – 106. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHEN Zheng-han, et al. Triaxial wetting tests of intact  $Q_2$  loess by computed tomography[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(10): 98 – 106. (in Chinese))
- [18] 冯怀平, 马德良, 王志鹏, 等. 基于范德堡法的非饱和土电阻率测试方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 690 – 696. (FENG Huai-ping, MA De-liang, WANG Zhi-peng, et al. Measurement of resistivity of unsaturated soils using van der Pauw method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4): 690 – 696. (in Chinese))
- [19] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平. 非饱和粉土路基内水分迁移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(7): 2241 – 2251. (YANG Zhi-hao, YUE Zu-run, FENG Huai-ping. Experimental study on moisture migration properties in unsaturated silty subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(7): 2241 – 2251. (in Chinese))
- [20] 王志鹏. 土体电阻率测试及其在动力湿化试验中的应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016. (WANG Zhi-peng. Soil Resistivity Testing and Its Application in Dynamic Slaking Test[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016. (in Chinese))
- [21] 吴忠学. 考虑厚度效应的 vdP 法土体电阻率测试研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019. (WU Zhong-xue. A Study

- on the Measurement of Soil Resistivity by vdP Method Considering Effect of Sample Thickness[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [22] CHU Y, LIU S Y, CAI G J, et al. Artificial neural network prediction models of heavy metal polluted soil resistivity[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, **25**(9): 1570 – 1590.
- [23] ZHANG D W, CAO Z G, FAN L B, et al. Evaluation of the influence of salt concentration on cement stabilized clay by electrical resistivity measurement method[J]. Engineering Geology, 2014, **170**: 80 – 88.
- [24] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(6): 1151 – 1155. (HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(6): 1151 – 1155. (in Chinese))
- [25] 周蜜, 王建国, 范璇, 等. 珠三角地区的土壤电阻率温度修正模型[J]. 高电压技术, 2012, **38**(3): 623 – 631. (ZHOU Mi, WANG Jian-guo, FAN Xuan, et al. Temperature correction models for soil electrical resistivity in Pearl River Delta[J]. High Voltage Engineering, 2012, **38**(3): 623 – 631. (in Chinese))
- [26] CAMPBELL R B, BOWER C A, RICHARDS L A. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts[J]. Soil Science Society of America Journal, 1949, **13**(C): 66 – 69.
- [27] 张世斌, 朱才辉, 袁继国. 降雨条件下重塑黄土中水分迁移模型试验研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(5): 621 – 630. (ZHANG Shi-bin, ZHU Cai-hui, YUAN Ji-guo. Laboratory model tests on moisture migration in remolded loess under rainfall conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(5): 621 – 630. (in Chinese))
- [28] DE MELO L B B, SILVA B M, PEIXOTO D S, et al. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **208**: 104876.
- [29] LI H, LI T L, JIANG R J, et al. A new method to simultaneously measure the soil–water characteristic curve and hydraulic conductivity function using filter paper[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, **43**(6): 20190162.
- [30] LEUNG A K, COO J L, NG C W W, et al. New transient method for determining soil hydraulic conductivity function[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(8): 1332 – 1345.
- [31] 许健, 任畅, 高靖寓, 等. 干湿循环效应下  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  盐渍原状黄土渗透特性与细观机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, **52**(5): 1644 – 1654. (XU Jian, REN Chang, GAO Jing-yu, et al. Influence of dry-wet cycles on hydraulic conductivity and microstructure of saline undisturbed loess with sodium sulfate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, **52**(5): 1644 – 1654. (in Chinese))