

DOI: 10.11779/CJGE201604023

基于高密度电阻率法的水分迁移模型试验研究

刘庭发¹, 聂艳侠¹, 胡黎明^{*1}, 周启友², 温庆博¹

(1. 清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 在土工模型试验中, 常用的应用于水分及溶质迁移过程量测的传感器量测、图像分析及取样分析等方法并不能充分满足三维、无损、实时的量测需求。高密度电阻率成像法为土工模型试验中三维、无损、实时量测需求提供了新的解决思路。基于高密度电阻率成像法发展一套适用于常规物理模型及超重力离心环境中土体电阻率测试设备和分析方法, 并通过开展模型试验验证其应用于水分迁移过程量测的适用性及有效性。常规物理模型试验(1g)表明, 该设备及方法能够获得模型土体中电阻率的三维时空分布, 入渗过程中电阻率与含水率的分布及变化合理反映电阻率与含水率定性关系; 在低有效饱和度区间, 电阻率法具有很高的灵敏度。离心模型试验结果表明, 重力水平的变化可导致水分在模型土柱中的分布发生显著变化; 实时量测技术及分析方法可为土工离心环境中渗流及溶质运移过程的分析提供更为准确的依据。高密度电阻率成像法可以成功应用于常规物理模型及超重力离心环境中水分迁移过程量测, 并保证一定的精度和灵敏度。

关键词: 电阻率成像法(ERT); 温纳法; 土壤电阻率; 水分迁移; 土工离心模型试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0761-08

作者简介: 刘庭发(1990-), 男, 硕士, 从事岩土工程方面的研究。E-mail: liutingfa2011@163.com。

Model tests on moisture migration based on high-density electrical resistivity tomography method

LIU Ting-fa¹, NIE Yan-xia¹, HU Li-ming¹, ZHOU Qi-you², WEN Qing-bo¹

(1. State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In geotechnical model tests, the methods conventionally employed in measuring water content and solute transport include sensor techniques, image processing techniques and direct soil sampling methods. However, these techniques cannot fully satisfy the necessities of three-dimensional, non-destructive and real-time measurement, especially in geotechnical centrifuge environment. A set of new measuring device and analyzing technique based on the high-density electrical tomography (ERT) method, is developed to investigate water migration at multiple gravitational levels. Two model tests, one on ground and the other in a geotechnical centrifuge, are conducted to verify the capability of the developed device in capturing moisture migration and distribution. The 3D infiltration model tests on ground (1g) show that the device is capable of measuring the 3D spatial and temporal distribution of soil resistivity in the model. The water migration and distribution during the infiltration process is reasonably reflected by the variation and distribution of soil resistivity. The resistivity method presents high sensitivity, especially when the soil is at relatively low saturation degree. In the 50g centrifugal model tests, obvious non-uniformity of water content distribution is observed at the loading and unloading stages, which indicates that moisture migration is highly subjected to gravitational levels and boundary conditions. The capability of real-time measurement and analysis of the ERT method provides critical insights into moisture migration in geotechnical model tests at multiple gravitation levels, and can be fed into a wide range of investigations regarding seepage and solute transport.

Key words: electrical resistivity tomography; Wenner array; soil resistivity; moisture migration; centrifugal model test

0 引言

渗流及溶质迁移问题是环境岩土工程领域研究的基本问题, 而针对土体含水率、溶质浓度的量测也是相关室内试验及野外监测的重要内容。目前, 在室内

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)课题项目(2012CB719804); 国家自然科学基金项目(51323014, 41372352, 50879038)

收稿日期: 2015-01-19

***通讯作者**

及野外量测中,针对水分及溶质迁移量测的方法主要有传感器量测、图像分析及取样分析3大类^[1]。传感器量测方法能够准确测得传感器位置附近区域土料参数值,经调整及标定后可达较高的测试精度;但该类方法为侵入式量测,探头及传输线路可能干扰介质中的物理过程,尤其在离心模型试验中需要考虑尺寸放大效应的影响^[2],对传感器尺寸及埋设位置有更高的要求;同时,该类方法通常为单点量测,剖面量测成本高,因而不适用于大面积、多断面量测^[3]。图像分析方法是一种非接触式无损量测手段,已在有机污染物迁移运动观测中得到广泛运用^[4];但该方法不适用于三维试验过程,量测效果及精度受土料、污染物类型及观测角度、距离等因素影响显著。直接取样分析能够获得较为准确的介质特性资料,但通常无法实现实时量测及分析,获取的试验过程信息有限,且整体的量测精度受取样位置、个数等因素的影响。上述常规量测技术并不能充分满足三维、无损、实时的量测需求,地球物理领域广泛应用的高密度电阻率成像法为多孔介质内物理过程的量测提供了新思路。

土体电阻率与含水率、盐度、结构及温度等多种因素有关,在其它因素不变或相对稳定时,可通过量测土体的电阻率来间接量测某单一因素的变化^[5-6]。高密度电阻率成像法(high-density electrical resistivity tomography, HDERT)通过在量测介质中布设电极,测定土体电阻并借助反演计算方法获得电阻率的时空分布,并利用电阻率与土体物理状态参数的定量关系来表征和量测某一物理特性的分布及变化^[7]。作为地球物理、水文地质领域的一种重要勘察方法,高密度电阻率成像法被认为是一种无损的实时量测方法,且具有电极布设方法灵活多样、应用简便、量测成本低^[8]等优点。该方法在地下水运动、污染物运移扩散、降雨入渗及蒸发过程、地层勘探等诸多方面得到了广泛应用^[9-13]。

在岩土工程领域,高密度电阻率成像法也逐渐得到关注和应用。如 Chambers 等^[14]、刘汉乐等^[15]采用该方法研究了非水相有机物(NAPLs)在土层中的运移扩散规律, Greve 等^[16]、Hassan 等^[17]采用该方法研究了土体裂缝开展规律, Muñoz-Castelblanco 等^[18]、Toll 等^[19]则利用该方法研究了土体在干湿循环条件下的相关特性。由于室内的单元或模型试验多为有限块体情形,与野外半无限空间情形差异很大,因而在运用该方法时,应充分考虑电极尺寸效应、边界效应等因素的影响^[20]。针对有限单元体的感度、电阻率反演计算仍是该方法研究应用中的热点及难点问题。电阻率成像方法在土工离心模型试验的应用还很少见。

Depountis 等^[21]采用微型的电阻率成像设备观察砂土中氯化钠溶液的运移扩散过程,但该研究尚停留在二维观测,获取的试验过程信息也较为有限。

本文发展一套适用于常规重力(1g)及超重力离心环境(Ng)条件下电阻率测定及分析系统,以实现水分及溶质迁移等物理过程的三维、无损、实时量测及分析。通过开展地面及土工离心模型试验,研究中心入渗及重力排水条件下模型土柱中水分迁移过程及分布规律,验证该量测方法的有效性及适用性。

1 测试原理和方法

1.1 相关概念

(1) 电阻率、视电阻率及装置系数

物质的导电性通常用电阻率描述。在均匀、无限、各向同性介质中,在供电电极 C_1 、 C_2 间通入大小为 I 的电流,并测量任意两电位电极 P_1 和 P_2 处的电位差 ΔU ,得到均匀介质电阻率 ρ 为

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (1)$$

式中, ρ 为均匀介质的电阻率($\Omega \cdot m$), K 为装置系数,与电极排布方式等有关(m)。由以上方法得到的电阻率反映深度为电势电极间距、位置为电势电极间连线中点处介质的综合导电性,称为视电阻率(apparent resistivity)^[22]。

(2) 四线法测电阻

测量电阻的方法很多,本文采用四线法测电阻率,即由两个电流电极、两个电势电极计算得到电阻率值,并通过扫描测定方法,按预先设定的电极组合进行遍历测定,得到不同区域范围内介质视电阻率大小及空间分布。常用的四线电极排列方式有偶极排列(dipole-dipole array)和温纳排列(wenner array),如图1所示,温纳排列中电极间距相等,其装置系数 $K_w = 2\pi a$ 。温纳排列具有信号强度高、水平方向敏感性较高、电极布设简便、易于分析计算等优点,且可通过布置多层电极以改善其量测深度方面的不足,为本文试验所采用。

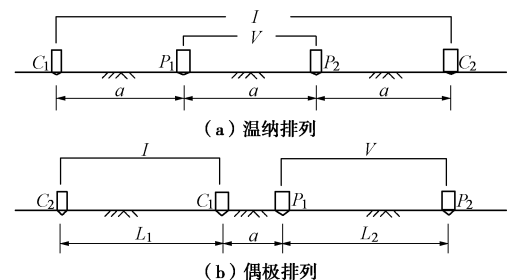


图1 温纳排列及偶极电极排列

Fig. 1 Configuration of Wenner array and dipole-dipole array

1.2 计算模型

在测得不同模型区域内电阻值及视电阻率后, 即可通过反演计算方法计算三维空间内电阻率的时空分布。针对有限单元体的电阻率反演需充分考虑单元体尺寸、边界条件、电极尺寸及布设方式等因素的影响。对于圆柱体模型, 本文研究采用 Zhou^[20]提出的镜像电流源方法计算模型内感度分布, 如图 2 所示。在反演计算中则采用 Zhou 等^[23]提出的修补算法, 由实测的电阻值计算模型中电阻率的三维时空分布。

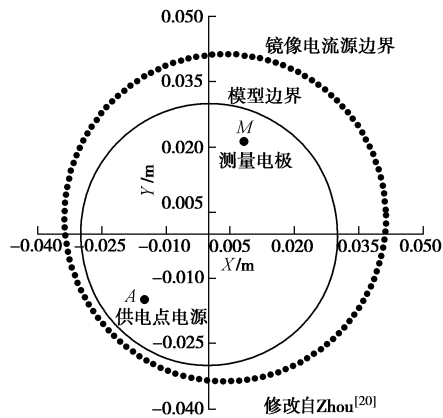


图 2 基于镜像电流源方法的感度矩阵计算

Fig. 2 Calculation of sensitivity matrix based on mirror current source method proposed by Zhou^[20]

1.3 高密度电阻率成像法

高密度电阻率成像法是以介质导电性差异为基础, 通过在模型区域周边或表面布设大量电极, 量测区域内土体电阻率以反映土体相关物理性质(如含水率)的分布及变化。根据四线法测电阻原理, 高密度电阻率量测设备通过向两电极输入电流, 在另两电极量测电压值进而得到电极影响区域内土体的电阻值和视电阻率; 通过变化电极组合测得土体模型中不同区域及范围内的电阻率数据; 采用电阻率反演算法建立电阻率分布的三维模型, 从而得到模型中的电阻率的三维时空分布, 借助电阻率与土体物理性质的定性定量关系进而实现对土体相关物理性质的量测分析。

2 试验模型

2.1 模型材料

试验采用的土料为高强度喷丸玻璃微珠, 由天津伊比莎玻璃珠有限公司供应。采用筛分法得到土料粒径级配曲线如图 3 所示, 相关物理性质总结如表 1 所示。

2.2 模型制备

试验采用的模型装置如图 4 所示, 主要包括主体模型筒、储液箱及入渗控制装置。主体模型筒内径为 46 cm, 高 70 cm, 由 2 cm 壁厚的有机玻璃制成, 两

侧各设置排水箱体, 可根据试验需求灵活设置水力边界。储液箱依据马氏瓶原理设计, 通过调整进气管高度实现不同的恒定入渗水头控制。自行设计的气压入渗控制装置可通过调整气压灵活实现入渗管路的开关控制, 与其它常用流体控制装置(如电磁阀等)相比, 该装置不产生杂散电磁场, 从而避免干扰电阻率测定设备及其它电子元器件的正常工作。

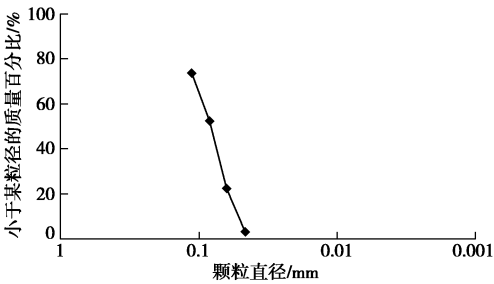


图 3 试验用玻璃微珠料级配曲线

Fig.3 Particle-size distribution of glass beads

表 1 试验用玻璃微珠物理性质

Table 1 Physical properties of glass beads

物理性质	测得值
中值粒径 d_{50}/mm	0.082
不均匀系数 C_u	1.788
曲率系数 C_c	0.984
颗粒比重 G_s	2.429
渗透系数 $K_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	1.0×10^{-3}

注: 渗透系数对应干密度为 1.48 g/cm^3 。

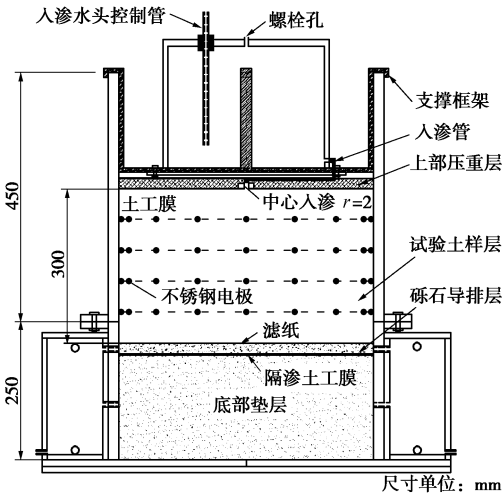


图 4 试验模型及电极布设示意图

Fig. 4 Schematic of strong box and arrangement of electrodes

制样前, 在有机玻璃模型筒周边涂抹凡士林, 以减少边壁渗流的影响。试验土料的初始质量含水率为 7%, 制样时干密度控制为 1.48 g/cm^3 , 采用分层夯实的方式, 每层的高度为 6 cm, 共分 5 层, 总高度为 30 cm。每层土料夯实至预定高度后, 在模型筒周边按顺

时针均匀布设不锈钢电极,共布设4层,每层的电极数为16个,从下往上电极布设高度分别为-24,-18,-12,-6 cm(z 轴正方向为竖直向上,零点为试样顶面的中心点)。制样完成后,在土样表面覆盖一层HDPE土工膜(厚度为1 mm),圆形土工膜中心设置直径4 mm的圆形孔洞,以模拟三维条件下通过中心缺陷处的入渗;土工膜上部上覆总质量为15 kg的土和不锈钢珠以施加覆盖荷载。最后将支撑框架、储液箱、入渗控制装置等放置于模型顶部。模型准备完成后,将电极接入电阻测定装置,编辑设定电极组合文件及测试模式,即可开始进行相关测试。

2.3 测试设备

试验采用的电阻率量测设备由南京九州勘探技术有限公司研制开发。电阻率量测及分析系统主要由电阻测定装置、不锈钢电极、数据采集及分析程序组成。电阻率测定装置以可编程控制器(PLC)作为电极组合及转换开关,配备256个测试端口,可最多接入64个测试电极,可通过编辑设定电极组合方式可实现点测、扫描测等电阻测定方式。试验采用的电极为不锈钢螺纹电极,长度为35 mm,直径为4 mm,电极尺寸相对模型尺寸很小,对试验结果的干扰可忽略。数据采集及分析系统基于Linux平台,主要包括测定控制、反演计算、数据后处理及成像等程序,并可通过网络进行远程测试控制,从而实现非常规试验条件(如超重力离心环境)下的测试及控制。

在进行感度及电阻率反演计算时,基于有限元方法,采用四面体单元进行单元剖分,节点个数为3770,单元个数为18792。

基于以上的试验模型及测试分析方法,为验证高密度电阻率方法应用于土工模型试验的可行性和适用性,分别开展常规重力条件(1g)及超重力离心条件(50g)下模型土柱试验,验证了高密度电阻率方法能够满足三维、无损、实时的量测需求,并就不同重力条件下模型土柱中水分迁移过程和分布规律进行分析探讨。

3 常规重力模型试验(1g)

首先开展地面条件下模型土柱顶部中心入渗模型试验,试验装置及模型实物如图5所示。入渗前首先测定若干组土料电阻(率)背景值。控制恒定入渗水头为10 cm,入渗总时长为192 h;试验中定期记录储液箱内液面高度,计算渗漏量及渗漏率。采用高密度电阻率测定系统进行连续测定,并通过反演计算得到土柱中电阻率的时空分布。试验结束后,对模型土柱中土料进行取样,采用烘干法测定土料的质量含水率。

试验中入渗总渗入量为1.732 L;开始入渗时,入渗速率较大,而后显著降低。试验停止时刻,入渗速率趋近于零。这一规律符合恒定水头条件下非饱和土中的入渗规律。

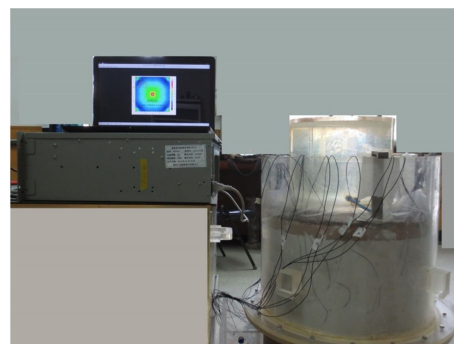


图5 地面模型试验实物图

Fig. 5 Setup of model tests on ground

首先分析比较4个典型时刻及4个横断面高度处电阻率分布。取入渗初始时刻、入渗82 h、入渗154 h、入渗192 h及典型高度($z = -6$ cm, $z = -12$ cm, $z = -18$ cm, $z = -24$ cm)处电阻率进行分析,结果分别如图6~9所示。

由图6入渗初始时刻电阻率分布结果可知,入渗前,土料电阻率在 $55 \sim 65 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,下部土料电阻率略低于上部土层。这主要是由于在制样后至开始入渗有一定的时间间隔,土柱内水分在自重作用下即往下部土层运动,使得下部土层含水率略高于土料初始含水率,从而电阻率稍低。

对比图7~9可知,随着入渗时间的推进,模型横断面电阻率均显著下降,表明土层中含水率逐渐增加;而不同高度横断面电阻率的分布规律及降低幅度存在明显差异。对于 $z = -6$ cm, $z = -12$ cm横断面,电阻率呈中间低而周边高,且随着入渗进行,低电阻率区域逐渐扩大。这表明模型上部土层为中心入渗的影响区域,水分的迁移运动主要由入渗水头驱动。试验终了时刻(入渗192 h), $z = -6$ cm, $z = -12$ cm横断面中心区域电阻率分别为 $38 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $32 \Omega \cdot \text{m}$,相比于入渗前的 $60 \Omega \cdot \text{m}$ 分别下降36.7%和46.7%。而对于 $z = -18$ cm, $z = -24$ cm横断面,断面中心区域电阻率值略高于周边,但差异很小($< 5 \Omega \cdot \text{m}$),且 $z = -24$ cm断面内的电阻率低于 $z = -18$ cm;这一规律表明模型下部水分迁移已不受上部入渗水头的影响,自重是驱动水分在模型土柱中迁移的最主要因素。试验终了时刻(入渗192 h), $z = -18$ cm, $z = -24$ cm横断面中心区域电阻率分别为 $26 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $19 \Omega \cdot \text{m}$,相比于入渗前的 $56 \Omega \cdot \text{m}$ 分别下降53.4%和66.1%。

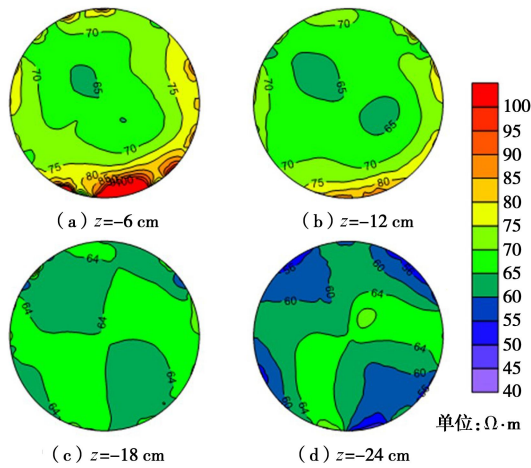
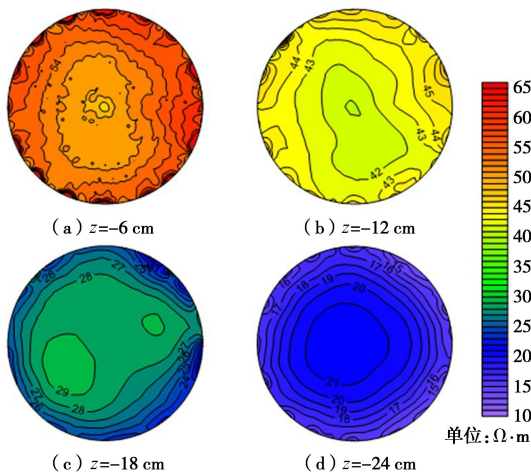
图6 初始时刻 ($t=0$) 典型横断面电阻率分布Fig. 6 Distribution of electrical resistivity in four cross-sections at $t=0$ h

图7 入渗 82 h 典型横断面电阻率分布

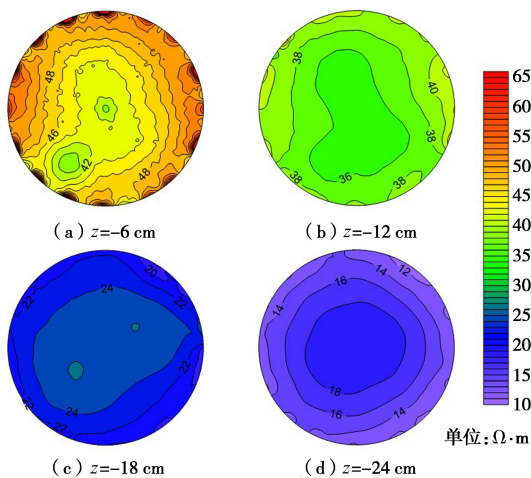
Fig. 7 Distribution of electrical resistivity in four cross-sections at $t=82$ h

图8 入渗 154 h 典型横断面电阻率分布

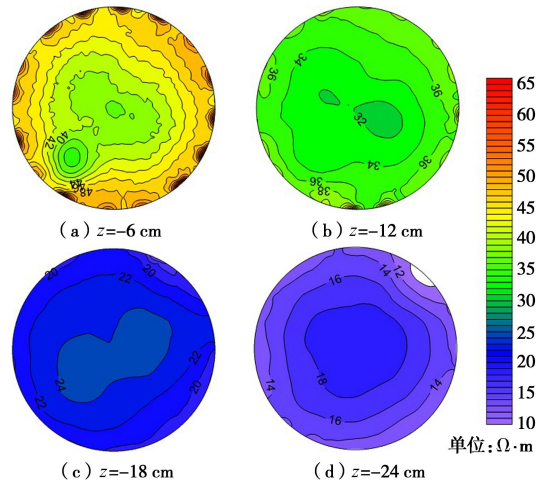
Fig. 8 Distribution of electrical resistivity in four cross-sections at $t=154$ h

图9 入渗 192 h 横断面电阻率分布

Fig. 9 Distribution of electrical resistivity in four cross-sections at $t=192$ h

由以上结果可知, 模型土柱中水分迁移过程受上部水头入渗及下部自重排水的双重影响, 且由于入渗水头较小 (恒定为 10 cm), 且土料的饱和渗透系数较小, 入渗作用的影响有限, 而水分在自重作用下的迁移及重分布影响显著。

为进一步探讨土料电阻率与含水率的关系, 对试验后土料进行取样分析, 实测得到的纵剖面含水率分布如图 10 所示, 相应的终了时刻 ($t=192$ h) 电阻率的纵剖面分布如图 11 所示。由图 10 结果可知, 含水率的分布规律为中心入渗区域处高于周边, 且随深度增大而增大。这一结果表明, 模型上部水分迁移主要受中心入渗影响, 含水率表现为中间高而周边低; 模型下部则主要受自重排水影响, 含水率分布较为均匀, 且随深度增大而增大。图 10 含水率与图 11 电阻率分布对比可知, 含水率与电阻率分布大致呈反比关系, 即含水率高的区域对应电阻率较低, 而含水率低的区域对应电阻率较高。这一规律符合对电阻率与含水率关系的定性认识。

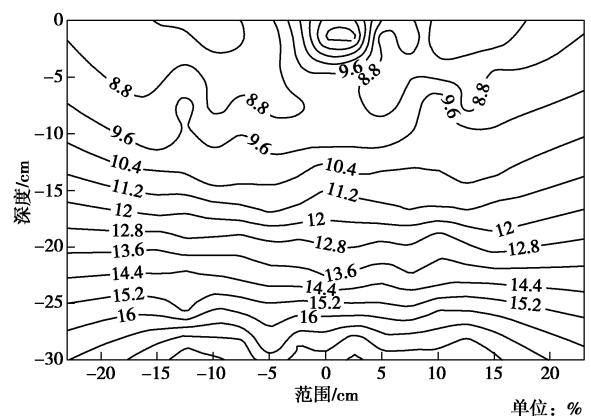


图10 试验后模型纵剖面质量含水率分布

Fig. 10 Distribution of measured water content in central vertical cross-section at the end of tests

诸多学者通过建立理论模型或经验公式定量描述土体含水率与电阻率的关系^[5-6],其中比较简洁且被普遍采用的是简化的 Archive 公式,其表达式为

$$\rho = \rho_0 S^{-\beta} \quad (2)$$

式中 ρ 为介质电阻率; ρ_0 为饱和时介质电阻率; β 为与介质特性有关的参数; S 为介质的有效饱和度。该公式表明,土体电阻率随含水率呈幂指数变化,有效饱和度 S 由 0 增大至 1 时,电阻率 ρ 随有效饱和度 S 的增加先迅速下降,后缓慢下降。本文试验中土料的初始含水率为 7%,初始饱和度为 26.5%;试验结束后,模型中部含水率为 12%,对应饱和度为 45.5%,电阻率则由初始的约 $60 \Omega \cdot \text{m}$ 下降至 $27 \Omega \cdot \text{m}$,降幅明显。由此可知,针对低含水率或低有效饱和度的土体,电阻率量测法具有非常高的灵敏度。需要指出的是,电阻率与含水率定量关系受土体性质、密实度等多种因素影响,实际应用时,需针对不同土料开展相关的标定试验建立定量关系曲线。

以上常规重力模型试验 (1g) 结果表明,高密度电阻率测定及分析系统能准确测定土料电阻值,获得入渗条件下电阻率的三维时空分布,非常敏感地测得电阻率随含水率的变化,合理反映水分的迁移过程及分布规律。初步验证了该系统运用于水分迁移过程量测的有效性和适用性。

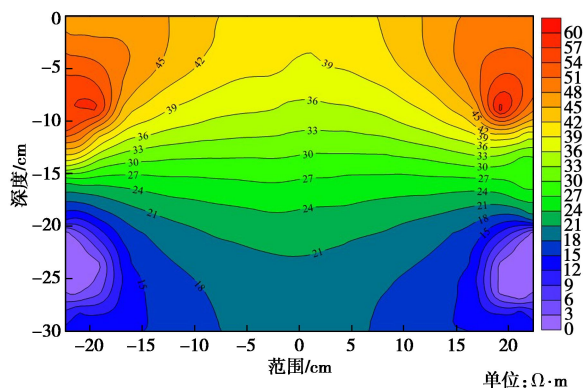


图 11 $t = 192 \text{ h}$ 模型纵剖面电阻率分布

Fig. 11 Distribution of electrical resistivity in central vertical cross-section at $t = 192 \text{ h}$

4 超重力离心模型试验 (50g)

为探究高密度电阻率方法应用于非常规土工模型试验中三维、实时量测的可行性,开展 50g 重力加速度条件下的土工离心模型试验,分析模型土柱水分迁移过程及电阻率分布规律。首先开展无入渗条件的模型试验,以研究土料中水分在不同重力水平条件下的迁移及分布规律。

对于超重力离心条件下的测试,则将电阻测定设

备固定于离心机转臂上,并通过无线网络从离心机控制室内控制测试动作并实时存储及分析测试结果。本文的离心模型试验在清华大学 50 g-t 土工离心模型试验平台完成,试验模型装置实物图如图 12 所示。

模型准备与试验方法参照 2.2 节中步骤进行。试验首先测得若干组土料电阻率背景值;采用分级加载的方式,从 1g 逐步加载至 50g,稳定一段时间后再进行卸载过程。离心运转持续时间为 1.4 h,试验过程中土料电阻进行连续测定。



图 12 离心模型试验实物图

Fig. 12 Setup of model tests in a 50 g-t geotechnical centrifuge

对实测电阻数据进行反演计算,得到不同试验阶段典型高度处电阻率分布如图 13 所示。由图中结果可知,加载前,背景电阻率的值在 $25 \sim 30 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,不同高度处电阻率差异较小,横断面内电阻率分布均匀。从 1g 加载至 20g 后,上部土层 ($z = -6 \text{ cm}$, $z = -12 \text{ cm}$) 电阻率有一定增大,而最下部土层 ($z = -24 \text{ cm}$) 电阻率明显下降,这表明土料中水分在离心作用下从上往下迁移。从 20g 加载至 50g 时,上部土层电阻率进一步增大,下部土层电阻率有一定增大。当离心加速度维持在 50g 时,上部土层的电阻率进一步增大,相比 1g 时, $z = -6 \text{ cm}$ 层中心区域电阻率由 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 增大至 $90 \Omega \cdot \text{m}$, $z = -12 \text{ cm}$ 层中心区域电阻率由 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 增大至 $70 \Omega \cdot \text{m}$ 。表明模型土柱中的水分在超重力离心条件下发生显著的沿重力方向迁移及在模型中重分布。由 50g 卸载至 1g 后, $z = -6 \text{ cm}$, $z = -12 \text{ cm}$, $z = -18 \text{ cm}$ 三个断面中电阻率均有一定程度的降低,其中最上层 ($z = -6 \text{ cm}$) 降低幅度约达 33.3%。这主要是由于卸载后土层中水分由毛细作用往上部土层迁移,土层中含水率增大,电阻率降低,且电阻率对含水率的变化非常敏感。图中结果同时表明,上部土层横断面内电阻率呈中间低而周边高的分布,表明周边土层中水分优先于中间区域往下迁移。这表明在超重力离心条件下,模型边界条件会对水分迁移及分布产生显著影响。

以上测试结果从试验角度直观地展现模型土柱中水分在超重力离心条件下的迁移及分布形态,表明在离心加载及卸载过程中水分均能发生明显的竖向迁移;且由于模型边界的影响,水分在同一高度断面也

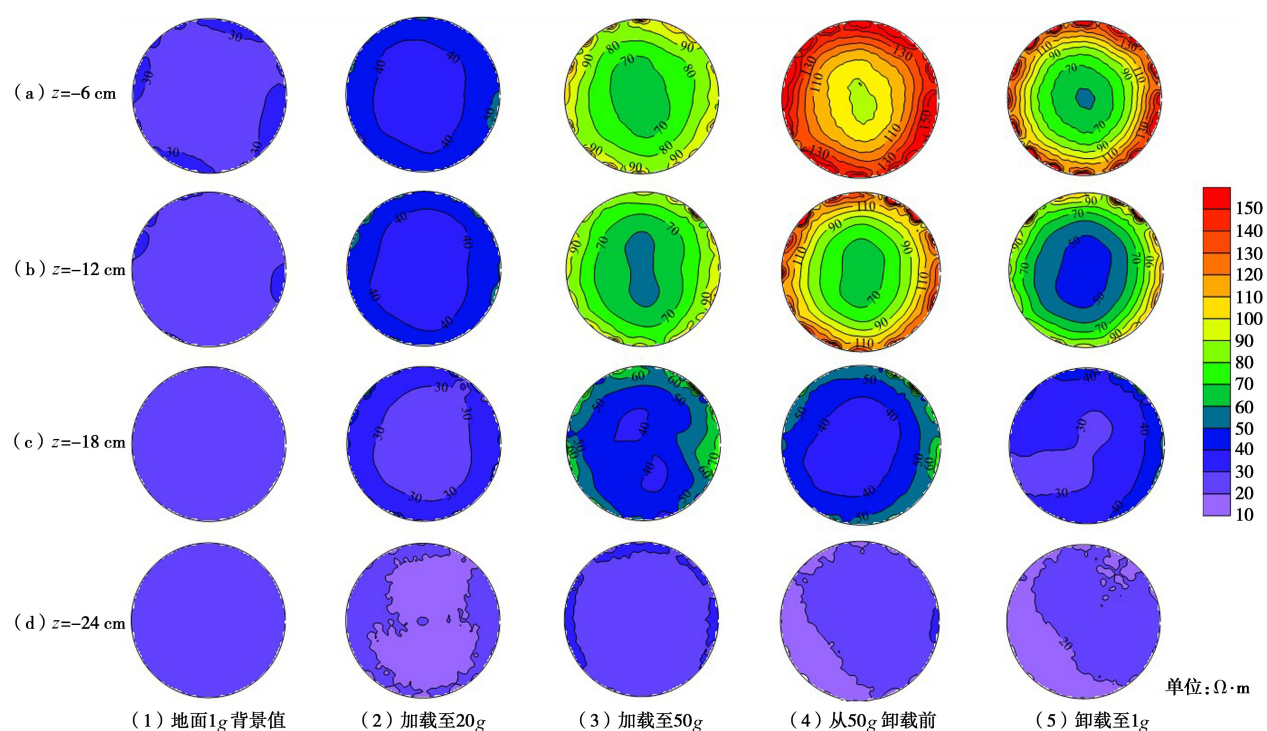


图 13 不同阶段典型横断面电阻率分布

Fig. 13 Distribution of electrical resistivity at different stages

可呈现不均一分布。现有的离心模型试验对于不同重力水平条件下水分重分布过程的考虑还不够充分，对其对于水分及溶质迁移过程的潜在影响也尚不明确。文中发展的高密度电阻率测试分析方法能够实时捕捉不同重力水平条件下模型中水分的迁移及分布形态，能够为超重力离心条件下渗流及溶质迁移过程分析提供更为准确的依据。

5 结 论

本文基于地球物理领域的高密度电阻率成像法，发展一套适用于土工物理模型试验的电阻率测试及分析系统。开展常规物理模型及土工离心模型试验，分析及探讨该测试技术应用于水分迁移过程量测的可行性和适用性，得到以下主要结论：

- (1) 常规物理模型试验表明，文中发展的高密度电阻率设备及分析系统能够获取土体电阻率的三维时空分布，入渗过程中电阻率与含水率的分布及变化合理反映电阻率与含水率定性关系。在低有效饱和度区间，土体电阻率随含水率变化敏感，电阻率法具有较高的灵敏度。
- (2) 土工离心模型试验得到了模型土体中水分迁移及分布规律，表明重力水平的变化可导致水分在模型土柱中分布发生显著变化；文中发展的实时量测技术可为土工离心环境下渗流及溶质运移过程的分析提供更为准确的依据。

(3)发展的高密度电阻率测试设备及分析系统能实现电阻率的三维、无损、实时量测，能够满足常规物理模型及超重力离心环境中的量测及分析需求，可为土体电阻率及相关物理化学性质变化及分布过程的研究提供设备及方法支撑。

需要指出的是，本文所测数据均为电阻率，下一步研究中将继续发展理论模型和标定技术，建立含水率以及溶质浓度与电阻率的相关关系，推动高密度电阻率法在土工模型试验中的广泛应用。

参考文献：

[1] LYNCH R J, ALLERSMA H G B, BARKER H, et al. Development of sensors, probes and imaging techniques for pollutant monitoring in geo-environmental model tests[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2001, 1(4): 17 - 27.

[2] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Chapman & Hall Press, United Kingdom, 1995.

[3] 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.

[4] PASHA A Y, HU L M, MEEGODA J N, et al. Centrifuge modeling of in situ surfactant enhanced flushing of diesel contaminated soil[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal,

- 2011, **34**(6): 623 - 633.
- [5] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, **46**(1): 45 - 70.
- [6] SAMOUËLIAN A, COUSIN I, TABBAGH A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: a review[J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(2): 173 - 193.
- [7] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (LI Jin-ming. Electric field and electrical prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [8] LOKE M H, CHAMBERS J E, RUCKER D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, **95**: 135 - 156.
- [9] BENSON A K, PAYNE K L, STUBBEN M A. Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods-A case study[J]. Geophysics, 1997, **62**(1): 80 - 86.
- [10] DEPOUNTIS N, HARRIS C, DAVIES M C R. Application of electrical imaging to leachate plume evolution studies under in-situ and model conditions[J]. Environmental Geology, 2005, **47**(7): 907 - 914.
- [11] ZHOU Q Y, SHIMADA J, SATO A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography[J]. Water Resources Research, 2001, **37**(2): 273 - 285.
- [12] ZHOU Q Y, SHIMADA J, SATO A. Temporal variations of the three-dimensional rainfall infiltration process in heterogeneous soil[J]. Water Resources Research, 2002, **38**(4): 1 - 15.
- [13] MORSE M S, LU N, GODT J W, et al. Comparison of soil thickness in a zero-order basin in the Oregon coast range using a soil probe and electrical resistivity tomography[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(12): 1470 - 1482.
- [14] CHAMBERS J E, LOKE M H, OGILVY R D, et al. Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, **68**(4): 1 - 22.
- [15] 刘汉乐, 周启友, 吴华桥. 轻非水相液体污染过程的高密度电阻率成像法室内监测[J]. 地球物理学报, 2008, **51**(4): 1246 - 1254. (LIU Han-le, ZHOU Qi-you, WU Hua-qiao. Laboratorial monitoring of the LNAPL contamination process using electrical resistivity tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, **51**(4): 1246 - 1254. (in Chinese))
- [16] GREVE A K, ACWORTH R L, KELLY B F. Detection of subsurface soil cracks by vertical anisotropy profiles of apparent electrical resistivity[J]. Geophysics, 2010, **75**(4): 85 - 93.
- [17] HASSAN A, TOLL D G. Electrical resistivity tomography for characterizing cracking of soils[C]// Proceedings of the Geo-Congress 2013, San Diego, Stability and Performance of Slopes and Embankments. California, 2013, III: 818 - 827.
- [18] MUÑOZ-CASTELBLANCO J, PEREIRA J, 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, 2012, **35**: 11 - 17.
- [19] TOLL D G, HASSAN A, KING J M, et al. New devices for water content measurement[C]// Proceedings of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013: 1200 - 1203.
- [20] ZHOU Q Y. A sensitivity analysis of DC resistivity prospecting on finite, homogeneous blocks and columns[J]. Geophysics, 2007, **72**(6): 237 - 247.
- [21] DEPOUNTIS N, HARRIS C, DAVIES M C R. An assessment of miniaturised electrical imaging equipment to monitor pollution plume evolution in scaled centrifuge modelling[J]. Engineering Geology, 2001, **60**: 81 - 94.
- [22] LAKE M H. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical imaging surveys: course notes for USGS Workshop[C]// 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data. Storrs, 2001.
- [23] ZHOU Q Y, SHIMADA J, SATO A. Three-dimensional soil resistivity inversion using patching method[J]. Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 1999, **39**(6): 524 - 532.