

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1159

非饱和粉土路基内水分迁移规律试验研究

杨志浩^{1,2}, 岳祖润^{1,3}, 冯怀平^{1,2}

(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 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 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: 动载作用下非饱和粉土路基内部的水分迁移规律, 对研究重载铁路在浸水状态下的路基稳定具有重要意义。基于范德堡原理, 利用土样的电阻率特性, 研制出一套基于 GDS 动三轴仪的非饱和土样含水率分布规律测试系统。利用该系统开展浸水动三轴试验, 并对试验过程中非饱和土样的分层含水率进行连续测试, 探究土样的初始压实度、动载的动应力幅值对非饱和土样内部水分迁移的影响规律。结果表明: 该测试系统可在动三轴试验过程中对非饱和土样的分层含水率进行实时、无损、连续地测定, 测试结果的最大误差为 0.7%; 非饱和土样在动载作用下随其含水率逐渐增大, 土样的初始压实度对电阻率的影响程度减弱, 接近饱和含水率时可忽略; 土样初始压实度、含水率与土体电阻率具有确定的函数表达式, 并具有良好的相关性及唯一性。结合试验结果分析认为: 降雨及动荷载共同作用下, 路基内水分在某一深度土体积聚, 该区域孔隙水压力增大, 强度降低, 导致翻浆冒泥病害的发生; 路基压实度及列车轴重增大, 均会抑制路基内水分向下部迁移, 有助于路基的稳定, 但轴重增加, 可能导致路基的失稳, 当轴重大于临界动应力时, 路基将发生破坏。

关 键 词: 范德堡法; 非饱和土样; 动三轴试验; 水分迁移

中图分类号: U 215.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 07-2241-11

Experimental study on moisture migration properties in unsaturated silty subgrade

YANG Zhi-hao^{1,2}, YUE Zu-run^{1,3}, FENG Huai-ping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Moisture migration inside unsaturated silty subgrades under dynamic loading is of great significance for investigating the stability of heavy haul railway subgrades in water immersion conditions. Based on soil electrical properties, a measurement system combined with a GDS cyclic triaxial instrument was developed relying on the van der Pauw principle to measure the water content distribution properties of unsaturated soil specimens. With the use of the aforementioned measurement system, water-supply dynamic triaxial tests were carried out. Moreover, the stratified water content of the unsaturated specimen was continuously measured during the test to explore the influence of the initial compaction degree of the unsaturated specimen and dynamic stress amplitude of dynamic loading on water migration inside the unsaturated specimen. This measurement system which can be used to determine the stratified water content of unsaturated specimens in real time, is able to achieve nondestructive and consecutive testing during dynamic triaxial tests, and the maximum error is only 0.7%. As the water content of the unsaturated soil specimen gradually increases under dynamic loading, the influence of the soil specimen initial compaction degree on resistivity decreases, and the influence can be ignored when the water content is close to saturated water content. A function exists to correlate soil resistivity with soil specimen initial compaction degree and water content, and the function has a high level of correlation and uniqueness. According to the analysis of the testing results, under the combined action of rainfall and cyclic loading, the water inside the subgrade accumulates to a certain depth inside the soil, and the pore water pressure in this area increases. The increase of pore water pressure decreases the strength and leads to the occurrence of mud-pumping disease. Increasing the subgrade compaction degree and the axle weight of the

收稿日期: 2019-07-02

修回日期: 2020-01-02

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (No. E2019210137); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (No. 2017G008-G, No. 2017G002-W, No. 2017G008-A)。This work was supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019210137) and the Technology Research and Development of China Railway Corporation (2017G008-G, 2017G002-W, 2017G008-A)。

第一作者简介: 杨志浩, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事重载铁路路基病害整治及路基结构优化方面的研究。E-mail: yangzhihao@stdu.edu.cn
通讯作者: 冯怀平, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事非饱和土测试及铁路路基变形控制等方面的研究。E-mail: fenghuai ping@stdu.edu.cn

train will inhibit the downward water migration inside the subgrade and contribute to subgrade stability. However, an excessive increase in axle load may result in subgrade instability. When the axle load is greater than the critical dynamic stress, the subgrade will be destroyed.

Keywords: van der Pauw principle; unsaturated soil specimens; cyclic triaxial test; moisture migration

1 引言

目前,铁路路基的翻浆冒泥病害已成为运营养护过程中的一项重要内容,其中重载铁路发生频次更高,范围更广,每年需耗费巨大的人力、物力来进行整治^[1-2]。然而,维修整治措施只能短时间内缓解病害的发生,彻底根治仍存在较大难题。我国大秦、朔黄、北同蒲等多条重载铁路中较多区段已形成雨时一片浆,过后一片白的情景,图1为病害调查某区段的翻浆冒泥实景图。



图1 翻浆冒泥典型断面

Fig.1 Typical section of mud-pumping disease

路基基床作为上部轨道结构静荷载及列车动荷载的主要承力层,翻浆冒泥病害发生后,整个基床结构在列车循环荷载作用下的稳定性及服役性将发生大幅度劣化。水分作为翻浆冒泥发生的必需要素,在整个病害发生过程中起着至关重要的作用。因此,理清病害发生时,降雨及动荷载耦合作用下路基内部的水分迁移规律,对于路基病害的有效根治、路基各结构层填料的优化选择及新型路基结构设计具有重要的实际参考价值。

较多情况下路基实际处于非饱和状态,目前针对非饱和土的水分迁移问题,较多学者也进行了相关研究,并取得了显著成果。李彦龙等^[3]研究了基质势、温度梯度对非饱和土中的气态水和液态水迁移的影响规律。康唐为^[4]研发了非饱和土电渗排水试验系统,研究了电渗作用下非饱和路基内部的水分迁移规律。张建红等^[5]结合离心机试验,研究了非饱和土中的水分迁移及污染物扩散。落宇杰^[6]利

用一维土柱仪进行了非饱和压实黄土状粉土毛细作用模型试验,研究了该填土的水分迁移规律。较多学者针对非饱和土的水分迁移规律虽进行较多研究,但针对翻浆冒泥病害发生中,浸水和动荷载耦合作用下路基内部的水分迁移规律研究还不深入。为模拟翻浆冒泥病害发生过程中的路基动力湿化工况,韩博文等^[7]设计了补水条件下的动三轴试验(即动三轴试验过程中,结合反压预留孔,通过马氏瓶在试样底部进行常水头补水,模拟降雨及列车动荷载共同作用下的实际工况,下文统称浸水动三轴试验),并采用烘干法对试验结束时刻的试样分层含水率进行测定,虽考察了试验结束后的水分重分布状况,但无法对试验中的水分重分布过程进行测试。为研究浸水和动荷载共同作用下路基内部的水分迁移,首先亟需研究一种能在动三轴试验过程中对试样的含水率分布状态进行实时测试的相关手段。

应用地球物理学来解决实际工程及环境方面遇到的问题是目前交叉学科发展的研究热点,土壤的电阻率分析方法也是该交叉领域的一项重要分支。土壤的电阻率测试在研究其工程物理特性及智能化监测方面表现出显著的优势^[8],研究依据为研究目标参数与土样电阻率之间存在一定的相关性。较多学者根据电阻率法对土样的晶体结构、含水率、孔隙率、密实度及液塑限等物理参数的变化规律也进行了大量研究^[9-11],取得了较为丰富的研究成果。冻土工程领域,结合电阻率的测试对冻土冻结过程中的冻结缘及冻结锋面的生成及迁移也进行了相关研究^[12]。微观研究领域^[13],由于土的微观内部结构与其宏观电阻率有着直接对应关系,故也有学者利用电阻率法来定量研究土体内部微观结构的变化,并进一步提出了基于电阻率法测定土体基质吸力及土-水特征曲线的方法。随着试验技术的不断发展,对试验测试手段的要求越来越高。要求在测定土样电阻率的同时不能破坏土样,并随之进行其他物理力学性质的测试工作。对土样电阻率的无损、实时测试技术已成为一项热门研究^[14-15]。

有学者针对范德堡法的工作机制进行了大量研究,表明该方法具有较强的科学性、稳定性及适用性^[16]。土体的电阻率与内部含水率有着较强的对应关系^[17],将范德堡法引入土工试验中土体的含水

率测试内容, 可行性较强。

本文基于范德堡原理, 利用土样的电阻率特性, 自主研发一套非饱和和三轴试样含水率分布连续试验装置, 并进行了稳定性、精度验证试验及含水率、电阻率标定试验。并结合 GDS 非饱和和三轴仪, 进行了浸水动三轴试验, 测试了试验中试样含水率分布的实时演变规律, 进而研究了初始压实度、动应力幅值对路基内部水分迁移的影响规律。克服了目前测试方法的局限, 为三轴试验过程中土样含水率的无损连续测定提供了有效的手段, 有望为翻浆冒泥、冻胀融沉、黄土湿陷性等众多岩土工程问题水分迁移机制探究提供一种可行措施。

2 非饱和和三轴试样含水率测试系统

2.1 测试原理

土体的电阻率测试方法有二电极法及四电极法^[17-18], 两种方法均要求柱状电极与土样之间充分接触, 实际操作中很难保证, 电阻率测定值误差较大, 一定程度上限制了其推广应用。

本文研发的非饱和和三轴试样含水率测试系统的测试原理为范德堡法^[19-21], 该方法可将电极布置在试样周围, 且试样可为任意形状。按照范德堡原理^[22], 在试样周围布置 4 个电极, 电流从其中 2 端分别输入和输出, 试样内部则产生电场, 其余 2 端间将产生相应的电压, 电压与电流做比得到相应的电阻值。整个测试分 2 步进行, 第 1 步如图 2(a)所示, NO 为电流输入端, MP 为电压测试端, 计算电阻 $R_{no,mp}$; 第 2 步如图 2(b)所示, PO 为电流输入端, MN 为电压测试端, 计算电阻 $R_{po,mn}$, 利用范德堡公式^[23]算得相应试样的电阻率值 ρ 。

$$\exp\left(-\frac{\pi d R_{no,mp}}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d R_{po,mn}}{\rho}\right) = 1 \quad (1)$$

式中: ρ 为所测试样电阻率; d 为试样厚度; $R_{no,mp}$ 和 $R_{po,mn}$ 分别为第 2 步电阻值。

当 $R_{no,mp} = R_{po,mn}$ 时, 求得电阻率 ρ 的解析解。较多情况下 $R_{no,mp} \neq R_{po,mn}$, 则可采用数值解法得到电阻率 ρ 的近似解。由于牛顿迭代法在求解数值方程中的快速收敛特点, 故作者用该方法进行求解, 求解结果为式 (1) 中电阻率 ρ 的任意精度近似解。结合电阻率测试结果, 本试验精度选取为保留整数。

2.2 测试装置

测试装置主要包括测试电极、交流恒流源、接通电极控制器、信号采集仪及计算机, 测试系统流程图如图 3 所示。

经过试验测试综合比选, 选用防极化性能和导

电性能均良好的钛作为电极材料, 每个电极长度为 10 mm, 宽度为 5 mm, 厚度为 0.02 mm。将 4 个电极分别按照试验内容设计位置用胶水固定在三轴膜上, 组成一个测试单元, 利用三轴膜的弹性达到土样与电极充分接触的效果。

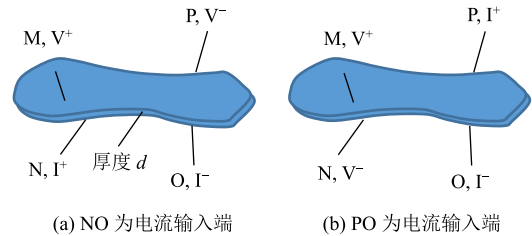


图 2 测试原理——电极布置图
Fig.2 Test principle—electrode layout

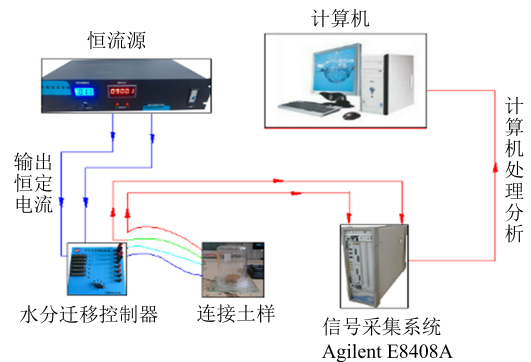


图 3 测试系统流程图
Fig.3 Flow chart of the measurement system

由于试样内部存在较多离子, 在选取钛薄片作为电极的基础上, 选用交流源作为电流输入源, 能够有效防止由于离子的定向移动而造成的极化现象。本试验采用的恒流源能够输出 0~1 mA 之间的恒定交流电流, 输出波形为正弦波, 频率范围为 100~1 000 Hz。

接通电极控制器可实现对输入电流及测试电压电极的切换, 且设置了灯光显示装置, 依据范德堡法测试原理, 手动进行测试电极的切换操作, 方便、准确。

电压信号采集装置为 Agilent Technologies E8084A 信号采集仪及 VT1436VXI Modules 模块。该模块拥有 51.2kSamples/Sec/Channel 的扫描速度, 可以提供可选 Voltage, Charge, Microphone 或 IEPE 的输入信号模式, 可一次性实现 64 至 8 192 节点数据的采集工作。并依据范德堡公式及牛顿迭代计算方法自主编程了自动计算软件, 可结合测试过程中采集的电压值及设置的电流值进行试样电阻率的自动计算及存储。

3 含水率测试系统稳定性研究

3.1 试验土样的物性指标

本试验用土取自朔黄铁路原平段内典型的翻浆冒泥病害路基加固段面, 现场病害调查表明, 基床层填土的含水率在 10% 左右。在石家庄铁道大学土工实验室对现场取土进行了击实、颗粒分析、颗粒比重、液塑限等试验, 击实曲线及颗粒分析曲线如图 4、5 所示。

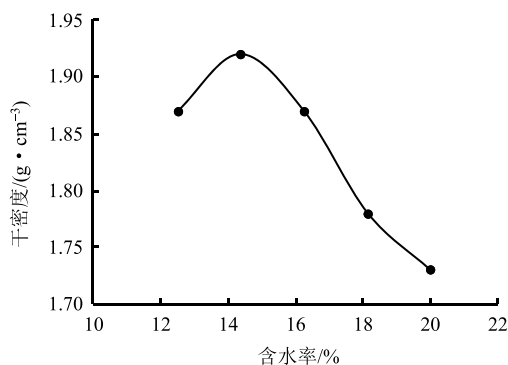
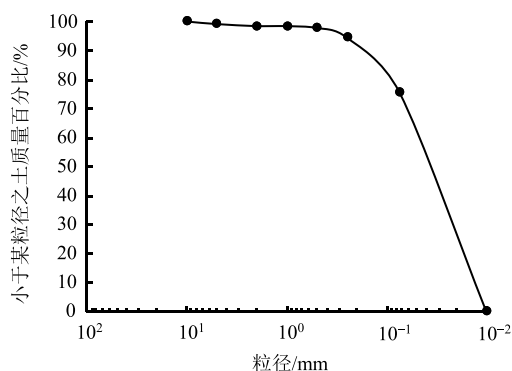


图 4 击实曲线

Fig.4 Compaction curve



3 种不同电极接通情况下电阻率的时域测试结果如图 8 所示。

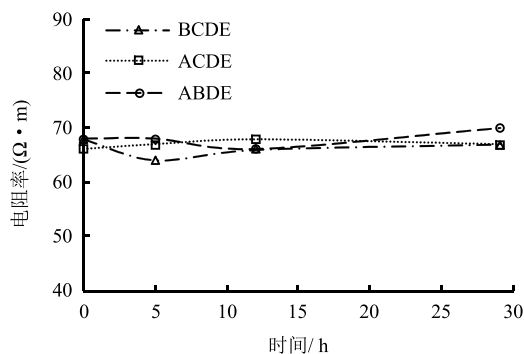


图 8 电极布置差异及时效效应验证曲线
Fig.8 Verification curves for different electrode arrangements and time effect

由图可知, 3 种电极布置条件下测试最大误差为 $6 \Omega \cdot \text{m}$, 各布置条件下时程电阻率测试最大误差为 $4 \Omega \cdot \text{m}$ 。从电阻率-含水率标定试验结果可得, 电极位置差异及时效性引起的电阻率误差值反算含水率误差值均满足土木工程相关规范内对于含水率测试允许误差要求 (1%)。误差可能由于土样制备过程中含水率的不均匀分布导致。试验结果表明电极位置的差异对电阻率测试影响可忽略, 且测试系统具有很好的稳定性。

3.2.2 试样几何形状对电阻率测试的影响

本试验装置的研发目的为能够在三轴试验中进行试样分层含水率的实时测定, 为验证试验过程中土样变形对电阻率测试的影响, 制备如图 9 所示的 4 种不同试样进行电阻率测定。4 种形状分别代表三轴试验过程中不同应力水平及工作条件下试样的常见变形性状, 分为正常稳定型试样 1 (直径为 19.5 mm)、椭圆形不规则变形试样 2 (长轴直径为 25.23 mm)、标准的三轴横向变形试样 3 (直径为 25.23 mm) 及内部有缺陷试样 4 (直径为 25.23 mm)。试样压实度为 0.93, 含水率为 9%, 厚度为 10 mm。



图 9 不同几何形状验证
Fig.9 Verification of different geometric shapes

相同压实度及含水率条件下, 在高度均为 10 mm 时, 不同几何形状土样的电阻率测试结果如表 1 所示。

表 1 不同几何形状试样的电阻率测定值
Table 1 Resistivity values for specimens with different geometries

试样类型	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4
电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	90	91	92	90

由表 1 可知, 4 类不同几何形状土样电阻率测定结果最大误差为 $2 \Omega \cdot \text{m}$, 同理, 反算后的含水率误差不足 1%, 表明在三轴试验中, 土样变形后电阻率值基本不变, 仍可进行试样含水率的测试。

3.2.3 试样高度对电阻率测试的影响

为探究三轴试样高度方向上不同测试单元间是否会相互影响, 特进行了 2 种条件下高度方向上的电阻率测定试验。试验过程中为了避免制样时造成试样含水率分布的不均匀性, 按照设计的含水率制备好试样后, 首先放入真空保湿器中进行保存, 通过分层含水率烘干试验验证, 表明该方法能够使得试样的含水率充分均匀分布。随后进行相关电阻率测试试验时, 密封不通电 24 h 后, 经过烘干法验证试样自身底部、中部及顶部的含水率差异很小, 满足测试精度要求。

(1) 同一土样 (含水率为 10%, 压实度为 0.95, 试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm) 不同高度处布置电极, 布置 8 层电极, 如图 10 所示。土样布置好后密封静止不通电 24 h, 然后进行电阻率测定。

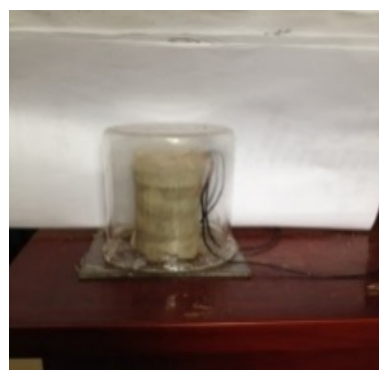
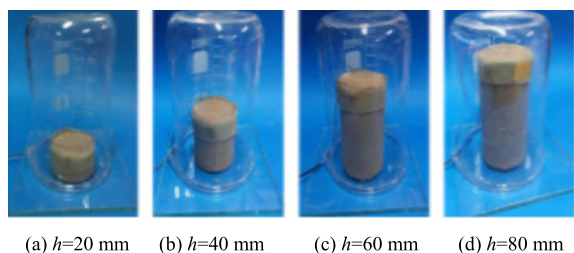


图 10 高度方向标定
Fig.10 Height direction calibration

(2) 制备不同高度土样 (含水率为 10%, 压实度为 0.95, 试样直径为 39.1 mm), 高度 h 分别为 10、20、30、40、60、80 mm, 将电极均布置在试样顶部密封静止不通电 24 h 后进行电阻率测定, 如图 11 所示。

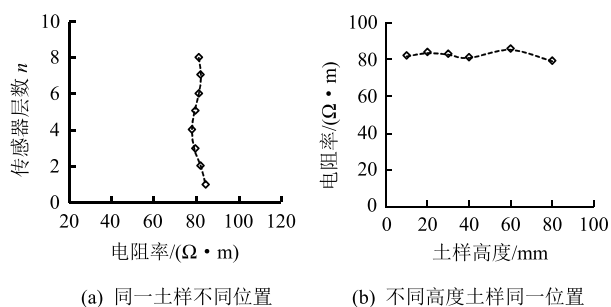


(a) $h=20\text{ mm}$ (b) $h=40\text{ mm}$ (c) $h=60\text{ mm}$ (d) $h=80\text{ mm}$

图 11 部分不同高度试样

Fig.11 Some specimens with different heights

同一试样沿高度方向上电阻率测定结果如图 12(a)所示,不同高度土样顶部进行电阻率测定结果如图 12(b)所示。



(a) 同一土样不同位置

(b) 不同高度土样同一位置

图 12 电阻率测试曲线

Fig.12 Resistivity test curve

同一土样不同高度处的电阻率测定最大差值为 $6\ \Omega \cdot \text{m}$,不同高度土样同一位置(试样顶部)电阻率测定最大差值为 $7\ \Omega \cdot \text{m}$,均在规范要求的误差范围之内。吴忠学^[25]对该问题进行了仿真计算研究,可知每个测试单元对土样施加的电场主要分布在 10 mm 厚度内土样中,电极外的土样中电场强度可以忽略。该结果表明三轴试验过程中多通道间不同高度土样含水率的测定互不干扰,且进行电阻率-含水率标定试验时,只需进行单一高度土样的标定即可,此时的标定关系仍适用于其他高度土样。

3.3 含水率、饱和度及压实度对电阻率测试的影响

为满足三轴试验过程中模拟不同压实度条件下路基变形及内部水分迁移特性的试验要求,完成测试系统的稳定性验证试验后,针对直径为 39.1 mm ,高度为 10 mm ,不同压实度(0.86、0.89、0.91、0.93)的土样,进行不同含水率(5%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%)条件下的电阻率测试试验,掌握含水率、压实度与电阻率之间的响应关系式。

压实度参数设计方面,主要依据现场路基基床碾压的实际工况,最小取值为 0.86,模拟压实质量欠缺。增大压实度将导致水分迁移现象不明显,由

于本文试验只选定一个马氏瓶补水水头,为了增加试样内部水分迁移的程度,故有意缩小了最大的压实度取值,将最大压实度设计为 0.93,后续的浸水动三轴试验中试样的压实度参数设计也是如此。

含水率参数设计方面,主要结合现场取土时的测试值 10%,首先选取了小于 10%的 3 个参数:5%、6%、8%,大于 10%的含水率设计采用每隔 2%依次增加,最大设计含水率的取值依据试验用土的液限(26%),液限接近饱和含水率,本着小于液限的原则,最大的含水率设计参数选取了 24%。

不同压实度、不同含水率条件下试样电阻率测试结果如图 13 所示,图中 k 为压实度。

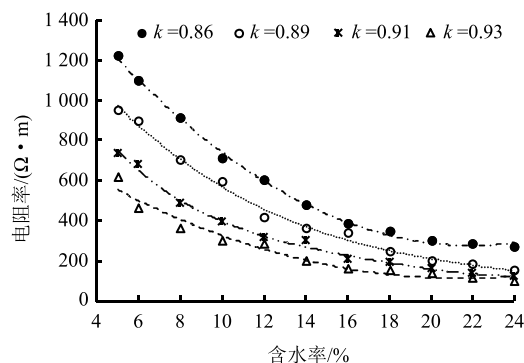


图 13 不同压实度下电阻率-含水率标定曲线

Fig.13 Resistivity-water content calibration curves under different compaction degrees

随含水率增大,电阻率逐渐减小,且变化趋势渐缓。随含水率的增大,土样单位体积内的离子数量显著增多,故电阻率显著下降。当含水率接近饱和含水率时,颗粒间的孔隙完全被水贯通,电流主要通过颗粒间水通道进行传递,含水率继续增大,电流通过的路径不变,故电阻率变化不大。

随压实度增大,电阻率相继减小。压实度增大,颗粒之间的孔隙减小,相同含水率条件下被水分子贯通的孔隙减少,电阻值增大,电阻率将减小。随含水率增大,压实度对电阻率的影响程度越来越弱,且当含水率达到饱和含水率时,压实度对电阻率影响较小。由于随着含水率的增加,电流通过颗粒间的水通道路径占主导作用,压实度增加导致的固-液通道及固-固通道路径造成的电阻率变化不明显。土样的质量含水率与其电阻率之间存在着指数函数或幂函数关系^[26],电阻率与压实度之间也存在着指数函数或幂函数关系^[27]。本文针对不同的拟合方式进行了综合分析,最终均选取了指数函数的关系式来拟合电阻率与压实度、含水率的关系,得到了针对该填土,同时考虑含水率和压实度参数的土

样电阻率计算公式：

$$\rho = ae^{-bk} \cdot e^{-cw} \quad (2)$$

式中： w 为土样含水率； a 、 b 、 c 为与土体性质有关的拟合参数，本试验三者分别为 $a = 2.598 \times 10^7$ 、 $b = 0.09937$ 、 $c = 10.99$ 。

该公式对试验数据的拟合效果较好，方差为 0.9833，表明土样电阻率与含水率、压实度具有很好的相关性及其唯一性。

上述内容可知，试样的含水率对电阻率有较大的影响，究其原因是含水率的不同所引起的试样饱和度的变化。饱和度发生变化时，电流经过试样内部的通道将发生变化。为探究试样饱和度对电阻率测试的影响规律，经过数据整理，得到了不同压实度条件下饱和度与电阻率的对应关系曲线，如图 14 所示。

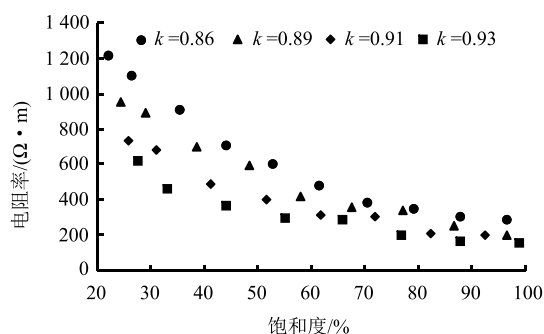


图 14 不同压实度下电阻率-饱和度标定结果
Fig.14 Resistivity-saturability calibration results under different compaction degrees

由图 14 可以看出，随饱和度的增加，试样的电阻率减小。当饱和度大于 70% 时，减小趋势渐缓。电流在试样内部的流通通道分为 3 种，包括只经过固体颗粒进行流通（称为 A' 通道）、在固体颗粒与水分的交界面进行流通（称为 B' 通道）及只经过水通道进行流通（称为 C' 通道）。其中 B' 通道所占的比重最大，由于固体颗粒导电性较差，故 A' 通道比重很小，而 C' 通道仅在试样达到一定的饱和度后才会出现。本文试验条件下，随着饱和度的增加，试样内部孔隙被较多的水分填充，电流通过 B' 通道进行流通的作用占据主导地位，故随着饱和度的增加，试样的电阻率相继减小，当饱和度大于 70% 时，经过 C' 通道流通的电流开始增加，而 C' 通道一旦出现，电流则优先选择其进行通过，故当饱和度大于 70% 时，随着饱和度的增加，电阻率的减小趋势渐缓。

3.4 含水率测试验证试验

利用测试装置对已配制好的一定含水率（12%、14%、16%、18%、20%），压实度为 0.93，高度为

10 mm 的土样进行含水率测定，计算试样的实际配制含水率与测试含水率间的误差，验证含水率测试系统的准确性。

实际配制含水率及测试含水率结果如图 15 所示。

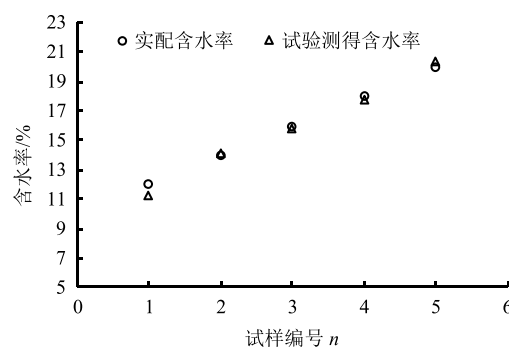


图 15 验证试验结果
Fig.15 Verification test results

由图可看出，试验测得的含水率与实际配制含水率最大误差为 0.7%，表明该测试装置具有较高的试验精度，为三轴试验中土样含水率分布的测试提供了一种有效手段。

4 浸水动三轴试验中试样内部水分迁移规律研究

掌握翻浆冒泥病害发生过程中路基内部的水分迁移规律对该病害变形机制的探究至关重要，故结合实际工况，设计了浸水动三轴试验。并通过上述含水率测试系统对试验过程中三轴试样的分层含水率进行连续测定，探索路基内部的水分迁移规律，并进一步探究了试样初始压实度及加载动应力幅值对试样内部水分迁移的影响。

4.1 试验装置的实现

为实现动三轴试验过程中试样含水率分布的实时测试，需将 GDS 动三轴仪与含水率测试装置的有效结合，并开展浸水动三轴试验。同时通过上述自主研发的非饱和三轴试样含水率分布测试装置对试验过程中不同高度范围内试样的含水率进行实时测试。2 种装置结合进行浸水动三轴试验的实景图如图 16 所示。

2 种装置的有效结合难点问题在于怎样实现围压室内试样周围布置的含水率测试电极与围压室外部的数据采集装置相连接，且如何密封压力室，防止试验过程中漏水。为了解决这个难题，经过研究，将 GDS 三轴仪围压室下部的围压施加预留孔进行了改造，特殊研制了针对该压力室下部预留孔尺寸的螺纹连接件及 O 型圈；然后将导线穿过热缩管、

利用注射器将添加凝结剂的液态硅胶注入热缩管, 利用热风枪加热, 直至有硅胶从热缩管中挤出停止加热; 随之待液体硅胶凝结成固体硅胶后, 将带有导线且填满硅胶的热缩管塞进螺母管, 拧上螺丝密封。事实证明用该方法密封效果良好, 当压力室内围压达到 500 kPa 时, 仍不漏水。

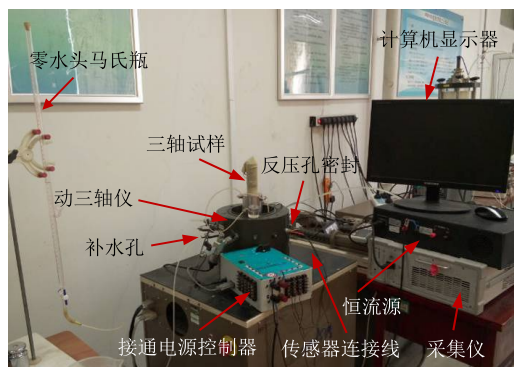


图 16 含水率测试装置与动三轴仪连接实景图

Fig.16 Real-life diagram of the moisture content test device connected to the dynamic triaxial instrument

4.2 水分迁移试验方案设计

本文拟进行不同初始压实度、动应力幅值条件下的浸水动三轴试验, 同时对试验过程中试样的分层含水率进行连续测试。

选取初始含水率为 10%, 直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 但压实度不同的试样, 进行不同动应力幅值条件下的动力湿化试验, 具体的试验设计参数均结合现场工程实际进行设计, 模拟现场实际发生工况, 如表 2 所示。动应力幅值大小依据朔黄铁路原平段现场动态测试数据进行设置, 选取 30、60、90、120 kPa。同时为了验证不施加动荷载, 单纯补水作用下试样内部的水分迁移规律, 进行了不施加动荷载下的静止三轴试验, 即动应力幅值为 0 kPa。结合现场路基基床表层的动态测试结果及相关文献资料, 围压均设计为 30 kPa。依据 C80 车辆、速度为 100 km/h 的通过主频率, 统一设置试验频率为 2.5 Hz, 加载波形形式为单向循环脉冲荷载。

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

分组	动应力/kPa	压实度
1	0, 30, 60, 90, 120	0.91
2	90	0.86, 0.89, 0.93

首先制备高度为 80 mm, 直径为 39.1 mm 的三轴试样, 并将 8 个传感器分别布置在试样的不同高度上, 每层土样高度 10 mm, 将橡皮膜布置在钢模

上且用吸水球将空气吸出, 并放入安装完传感器的三轴试样, 试样顶端及底端放入透水石和滤纸, 然后撤下吸水球使橡皮膜紧包试样, 防止漏水, 最后将布置完传感器的试样安装在三轴仪上的金属柱上, 并完成含水率测试系统与传感器间的有效连接及密封。其他三轴试验操作依据铁路工程土工试验规程《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010)^[24], 高架加载模块设置振次为 10 000, 采集点数为 20 点/周, 破坏标准选取轴向应变 10%。试验开始后, 首先进行 1 200 振次动载试验, 然后打开补水开关开始补水, 试验达到轴向应变 10%或达到预先设定振次时试验停止。试验过程中 GDS 三轴仪计算机对土样的轴向累计应变进行采集, 含水率测试系统对试样各层土样含水率进行连续测试。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 动力湿化试验过程中试样内部的含水率重分布演变规律研究

由于不同试验条件下试样内部的含水率分布演变规律类似, 本文仅选取了压实度为 0.89, 动应力幅值为 90 kPa 时的试验数据进行分析。图 17 为试验过程中各层土样含水率的时程变化曲线。土样分为 8 层, 每隔 10 mm 为一层, 由下向上计数依次增加。图 18 为选取的 6 个时间节点试样高度方向上的含水率分布曲线。图中红色虚线均为 10% 含水率线。

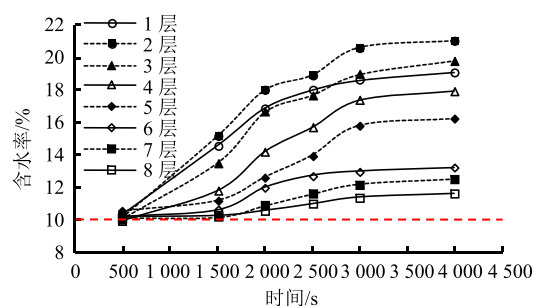


图 17 试样分层含水率时程变化曲线

Fig.17 Time-history curves of stratified water content

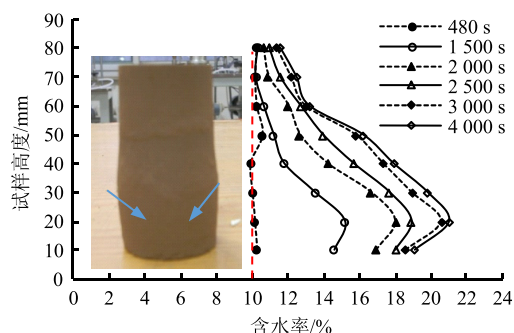


图 18 不同时刻试样含水率分布曲线

Fig.18 Water content distribution in the specimen at different times

可以看出,浸水动三轴试验过程中,每层土样含水率最终均大于初始含水率 10%,表明该试验条件下各土层均发生了水分的迁移,但发生的时间不同,层数越高,发生水分迁移的时间滞后。各层水分迁移初期,含水率增长速率较大,后期增长速率变缓,3 000 s 以后各层含水率基本稳定,经过对马氏瓶补水量的监测,3 000 s 后的浸水量也趋于稳定。各层土样水分迁移过程中,含水率增长速率存在差异,第 1~5 层增长速率较快且近似,含水率增长曲线近似平行,水分迁移量较多。第 6~8 层增长较慢,且水分迁移量较小。试样 20 mm 高度处含水率始终最大,与试验结束后试样的外鼓变形最大位置一致。由于补水的重力势作用与动荷载的泵吸作用导致水分的迁移方向相反,两个作用的耦合结果导致水分在特定深度处土层积聚。路基发生翻浆冒泥病害的产生机制可解释为,在降雨及动荷载的共同作用下,内部某一深度范围土体内水分积聚,动荷载作用下孔隙水压力急剧增大,强度下降,变形增加,从而导致该土层受到的动应力更大,恶性循环,最终诱导路基病害的产生。

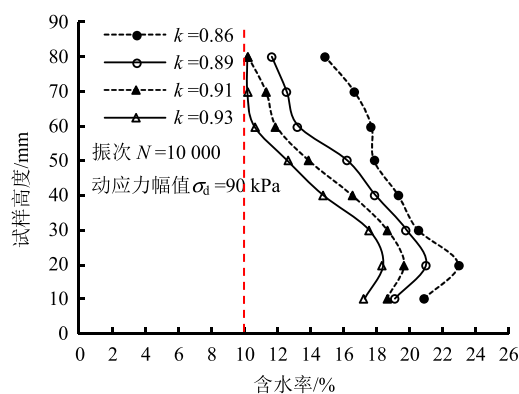
4.3.2 压实度及动应力幅值对试样内部水分迁移规律的影响研究

选取不同压实度及动应力幅值条件下,试验结束后试样的含水率分布结果进行分析,研究压实度、动应力幅值对试验过程中水分迁移的影响。图 19(a)为动应力幅值为 90 kPa,压实度分别为 0.86、0.89、0.91、0.93 试样结束时刻的试样含水率分布曲线。图 19(b)为试样压实度 0.89,动应力幅值为 30、60、90、120、0 kPa 条件下试验结束时刻的试样含水率分布曲线。

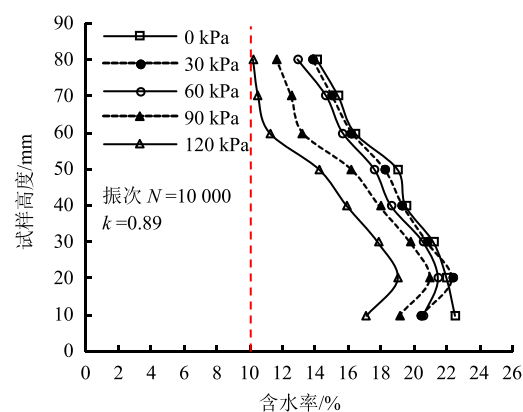
由图 19(a)可以看出,随压实度增大,试样各层含水率均降低,且当压实度达到 0.93 时,试样上部 20 mm 土层基本不发生水分迁移。随着压实度的增加,试样渗透性降低,水分发生迁移所消耗的能量大,整个试样水分迁移量减少,以至于当压实度达到 0.93 时,补水及动荷载耦合作用无法促使水分在上部土层内迁移。

由图 19(b)可以看出,5 种不同动应力幅值条件下,试样各层均发生了明显的水分迁移现象。随动应力幅值增加,试样内部各层含水率降低,且衰减速率增大。当动应力幅值由 0 kPa 增加到 60 kPa 时,变化不明显,但由 60 kPa 增加到 120 kPa 时,变化较大。不施加动荷载作用时(即动应力幅值为 0 kPa),

试样最下部含水率最大。施加动荷载时,试样在 20 mm 高度处含水率最大,可以看出动荷载对路基内水分迁移具有显著影响。动应力幅值增加首先对试样起到一定的压实作用,其次动应力增加,在试样内部产生的泵吸作用越大,两个作用均抑制了内部水分的迁移,最终导致试样各层含水率的降低。



(a) 不同压实度



(b) 不同动应力幅值

图 19 不同压实度、动应力幅值试验结束试样含水率分布

Fig.19 Water content distribution in the specimens at the end of tests with different compaction degrees and dynamic stress amplitude conditions

5 结 论

(1) 所研发的测试装置对土样电阻率的测试具有较高的精度及稳定性,含水率最大测试误差为 0.7%,满足规范误差要求。

(2) 随着含水率及饱和度的增大,土样的电阻率减小,且变化趋势渐缓。其他条件相同时,压实度越大,电阻率越小,且当饱和度大于 70%时,压实度对电阻率的影响趋势减弱,当土样接近饱和时,压实度对电阻率的影响可忽略。

(3) 得到了考虑压实度及含水率参数的土样电阻率计算公式,相关性及唯一性良好。为实现动三

轴试验过程中土样分层含水率的连续测试,提供了有效依据。

(4) 降雨及动荷载共同作用下,初期水分迁移速率较大,随后速率渐缓,最终路基内水分在某一深度土体积聚,致使该区域孔隙水压力增大,强度降低,诱导翻浆冒泥病害的发生。

(5) 路基压实度及列车轴重增大,均会抑制路基内水分向下部迁移。但轴重增加,可能导致路基的失稳,当大于临界动应力时,路基将发生破坏。

参考文献

- [1] 冷伍明, 栗雨, 滕继东, 等. 易发生翻浆冒泥的细粒土物理状态指标分析与评判[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 116-122.
LENG Wu-ming, SU Yu, TENG Ji-dong, et al. Analysis and evaluation on physical characteristics of fine-grained soils prone to mud pumping[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2018, 40(1): 116-122.
- [2] 梅慧浩, 冷伍明, 聂如松, 等. 重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1603-1613.
MEI Hui-hao, LENG Wu-ming, NIE Ru-song, et al. Random distribution characteristics of peak dynamic stress on subgrade surface of heavy haul railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(4): 1603-1613.
- [3] 李彦龙, 汪留松, 王铁行. 基质势梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6): 847-851, 859.
LI Yan-long, WANG Liu-song, WANG Tie-xing. Moisture migration of unsaturated soil due to matric suction gradients[J]. **Journal of Xian University of Agriculture and Technology (Natural Science Edition)**, 2017, 49(6): 847-851, 859.
- [4] 唐康为. 电渗作用下非饱和路基土水分迁移规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
TANG Kang-wei. Study on the law of moisture migration in unsaturated subgrade soil under electroosmosis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [5] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 622-625.
ZHANG Jian-hong, LAO Min-ci, HU Li-ming. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 622-625.
- [6] 落宇杰. 毛细作用下非饱和黄土状粉土水分迁移特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
LUO Yu-jie. Experimental study on water transfer property of unsaturated loessial silt with capillary action[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [7] 韩博文, 冯怀平, 应志超, 等. 振动荷载作用下浸水过程对重载铁路基床变形特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 221-228.
HAN Bo-wen, FENG Huai-ping, YING Zhi-chao, et al. Influences of soaking process on deformation characteristics of heavy haul railway subgrade under vibration load[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2019, 38(1): 221-228.
- [8] RAKORENKO N N, KOROTCHEN-KO T V. Impact of petroleum products on soil composition and physicochemical properties[J]. **Earth and Environmental Science**, 2016, 33(1): 012-028.
- [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] 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.
- [12] 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 and Technology**, 2015, 113(2): 1-11.
- [13] 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, 31(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 and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 1003-1008.

- [14] ZHUO W, LI M. A detector for plant electrical conductivity based on four-electrode method[J]. **Sensor Letters**, 2010, 8(1):122-127.
- [15] BURGER H R, BURGER D C. Exploration geophysics of the shallow subsurface[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992.
- [16] 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(13): 1927-1934.
- [17] PREIS W. Modelling of surface exchange reaction, oxygen diffusion, and conductivity relaxation of solid oxides: application to the van der Pauw method on disk-shaped samples[J]. **Computational Materials Science**, 2015, 103(6): 237-243.
- [18] 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(5): 1299-1305.
- [19] SON Y, OH M, LEE S. Estimation of soil weathering degree using electrical resistivity[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2009, 59(6): 1319-1326.
- [20] 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, 44(10): 1968-1979.
- [21] NÁHLÍK J, KAŠPÁRKOVÁ I, FITL P. Influence of non-ideal circumferential contacts on errors in the measurements of the resistivity of layers using the van der Pauw method[J]. **Measurement Journal of the International Measurement Confederation**, 2013, 46(2):887-892.
- [22] VAN DER P. Method of measuring specific resistivity and hall effect of disks of arbitrary shape[J]. **Philips Research Reports**, 1958(13): 1-9.
- [23] MORÓN Z. Investigations of van der Pauw method applied for measuring electrical conductivity of electrolyte solutions: measurement of electrolytic conductivity[J]. **Measurement**, 2003, 33(3): 281-290.
- [24] 中华人民共和国铁道部. TB 10102—2010 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- People's Republic of China Ministry of Railways. TB 10102 — 2010 Railway engineering geotechnical test procedures[S]. Beijing: China Railway Press, 2010.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 周仲华, 郑龙, 孙博. 土遗址墙体含水量与电阻率关系研究[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(Suppl. 2): 4054-4058.