

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0051-05

# 掺石灰黏土电阻率试验研究

孙树林<sup>1,2</sup>, 李 方<sup>3</sup>, 谌 军<sup>4</sup>

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 地球探测与信息技术研究所, 南京 210098;  
3. 江苏南京工程高等职业学校, 南京 211113; 4. 水利部河北水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

**摘 要:** 利用 4 电极电阻率测量装置, 在室内对各种灰土样的电阻率进行测试对比研究, 揭示了不同因素如灰土比、含水率、饱和度、土的结构和土粒粒径等对灰土样电阻率的影响。在不同含水率 (15%、20%、25% 和 30%) 条件下, 素土及其与不同石灰掺量 (1:10、1:15 和 1:30) 的混合, 通过轻型击实试验后, 测量其横向及竖向断面上的电阻率, 研究电阻率与不同石灰配比击实土样的物理力学性质之间的关系。实验结果表明, 当含水率在 15%~20% 之间时, 较小的含水率增量引起混合土样电阻率的大幅度下降; 当含水率约达到 20% 后, 其电阻率随含水率的继续增加而减小的幅度很小; 在 15% 含水率时, 掺灰土电阻率比素土样高; 在 30% 含水率时, 其电阻率低于素土样, 而且掺量越大, 电阻率越低; 由于击实导致土体颗粒的结构重新排列, 电阻率在横向上大于竖向; 电阻率随着无侧限抗压强度的增加而增加, 在电阻率大于  $50 \Omega \cdot m$  时, 电阻率随无侧限抗压强度的增加而减小; 饱和度、干密度与电阻率呈负指数变化规律, 孔隙率、孔隙比与电阻率呈指数变化规律; 含水率对于电阻率的影响较为敏感。

**关 键 词:** 电阻率; 极距; 击实土; 敏感性分析

**中图分类号:** TU 443 **文献标识码:** A

## Electrical resistivity measurement for lime-stabilized silt soil

SUN Shu-lin<sup>1,2</sup>, LI Fang<sup>3</sup>, CHEN Jun<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Institute of Geodetection and Information Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing 211113, China; 4. Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** The electrical resistivity of various lime-soil samples are studied indoor with four electrode resistivity measurement, the effects of different factors such as lime-soil ratio, water content, water saturation, soil structure and particle size on lime-soil samples were revealed. Under different water contents (about 15%, 20%, 25% and 30%), soil were mixed with lime at different lime-soil ratios (about pure soil, 1:10, 1:15 and 1:30). With light compaction test, the traverse and vertical resistivity of mixed soil samples were measured and the relationships between resistivity and physical properties of mixed soil samples with different lime-soil ratios are studied too. The electrical resistivity of mixed soil samples drops greatly with 15%-20% water contents, increases with about 20% water content; and the resistivity reduces as the water content increased continuously. The electrical resistivity of lime-mixed soil sample larger than electrical resistivity of pure soil with 15% water content, but the resistivity of lime-mixed soil samples is smaller than pure soil samples with 30% water content. The resistivity is more lower as the lime mixing amount is larger. The electrical resistivity at transverse section is larger than at vertical section. The electrical resistivity increases from 0 to  $50 \Omega \cdot m$  as the unconfined compression strength increases. When the electrical resistivity larger than  $50 \Omega \cdot m$ , the resistivity decreases as unconfined compression strength increases. The relationship between water saturation and dry density is negative exponent; the relationship between porosity and void ratio is exponent reverse to the dry density. The resistivity is sensitive to the water content.

**Key words:** electrical resistivity; electrode distance; compacted soil; sensitivity analysis

## 1 引 言

许多公路、铁路修筑在黏土地区, 由于黏土的

特点是遇水后强度很低, 其病害问题每年都给国家造成巨大的损失<sup>[1]</sup>。为此, 人们经常将石灰与黏土混合用于改善和增强路基的性能, 同时, 也由于石

收稿日期: 2008-01-27

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(No. 2005408911); 留学回国人员科研基金项目资助(No. 20071108)。

第一作者简介: 孙树林, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: slsun@hhu.edu.cn

灰具有就地取材、防渗效果好、造价低廉等而便于推广<sup>[2-3]</sup>。尽管如此,在灰土路基的质量检测等方面仍有诸多问题尚需解决。笔者通过对不同掺合比灰土样的电阻率室内测试研究,探讨石灰等掺合料加入后黏土的水硬化过程,揭示不同掺合比灰土样的电阻率特性,并分析影响掺石灰土电阻率的因素。

## 2 测试原理及试验方法

### 2.1 土性及土样制备

#### 2.1.1 试验土样

土样取自扬州溧阳段高速公路 K23+800~K49+350 段,约 0~5.0 m 路基土。土样为黄色,黏性比较大,有膨胀性。其天然状态物理指标见表 1,其颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 土样的物理性质指标  
Table 1 Properties of soil samples

$\omega$ /%	$G_s$	$e$	$W_L$ /%	$W_P$ /%	$I_p$ /%	细粒含量		土的分类 标准 <sup>[4]</sup>
						/%	/%	
						Fines	Clay	
36.8	2.71	1.22	40.8	22.2	18.6	48.1	46.1	CL

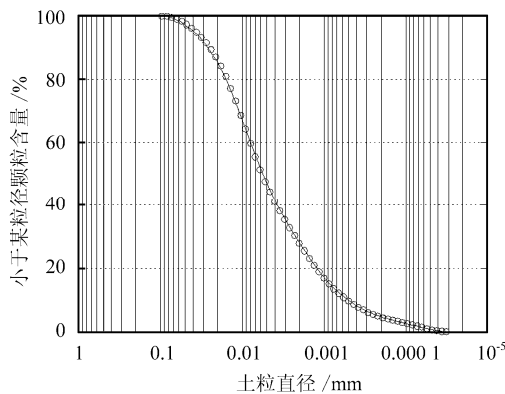


图 1 土样的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distributions of the soil samples

#### 2.1.2 样品准备

土样烘干后,根据《土工试验规程》<sup>[9]</sup>,计算每个击实试样所需土样重量,并计算获得一定的含水量下土样所需加水的质量。具体过程如下:①将土样和石灰分别过 5 mm 筛;②按照石灰与土配比分别为 1:30、1:15 和 1:10 计算所需土量及石灰量;③按 15%、20%、25%和 30%含水率分别计算所需加水的质量,再与上一步骤所需土量混合并搅拌均匀;④将拌好的土样分成 3 次放入轻型击实筒中击实,每次击数为 25 击,用刀刮平后称量击实筒加土样的总重量;⑤将土样利用千斤顶顶出,用保鲜

膜包裹试样以便进行电阻率的测量。

### 2.2 电阻率法测试原理

本次所用仪器为重庆奔腾数控技术研究所生产的 WDDS-1 数字电阻率仪。电阻率测量装置有 2 电极<sup>[5-6]</sup>和 4 电极<sup>[7-8]</sup>两种,4 电极装置见图 2,即电极为 4 根等长等体积、蘸 CuSO<sub>4</sub> 溶液的饱和棉球包裹铜棒,图中  $L$  为电极间距离,测量时先从样品表面插入 4 个电极 A、M、N 和 B,其插入深度一致。由稳压电源 E (输出电压为 22.6 V) 向外侧电极 A 和 B 施加电流  $I$ ,电流由电极 A 流入,经电极 B 返回电源,电流场在电极上产生电势,用电位差计或者高电阻电压表就可以测得电极 M 和 N 间的电位差。

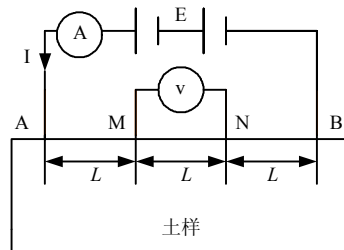
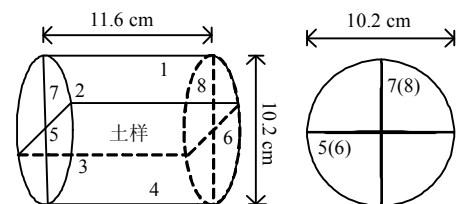


图 2 四电极电阻率测试装置示意图

Fig.2 Four electrodes resistivity measurement system

### 2.3 试验过程

测试具体过程如下:①沿横向测线(图 3 中 1~4 测线)测量取出的土样表面(横向)的电阻率;②沿竖向测线(图 3 中测线 5~8 测线)测量取出土样截面(竖向)的电阻率;③把测试完的土样根据无侧限抗压强度试验要求切割,测量无侧限抗压强度。④准备下一组实验。



沿土样表面测线: 横向(1-4) 纵向(5-8)

图 3 土样表面和横截面的测线布置图

Fig.3 The survey lines of lime-stabilized soil sample

## 3 结果与分析

### (1) 含水率与电阻率

图 4 为不同石灰配比的含水率变化对其电阻率的影响试验曲线。从图 4 中看出,混合土样的电阻率随含水率的增加而减小,当含水率在 15%~20% 之间时,较小的含水率增量会带来混合土样电阻率

的大幅度下降。同时可见，灰土在含水率约达到 20 % 后，电阻率随含水率的继续增加而变化的幅度很小。这主要由于在含水率较小的时候，增加土的含水率，孔隙水连通性得到改善，通过孔隙水初始导电，导致图 2 中导电路径导电性能的改善，致使土的电阻率随含水率的增加而大幅度减小；当含水率超过 20 % 后，土体孔隙中孔隙水的连通性已达较好状态，土的含水率的继续增加对孔隙水的连通性的影响不大。因此，土的电阻率随含水率的继续增加而减小的幅度很小，土的含水率的变化对土电阻率的影响也就较小了。

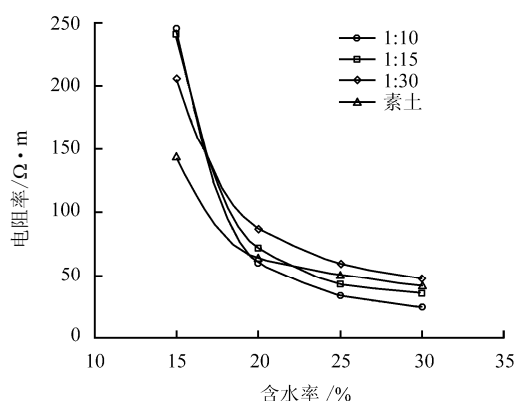
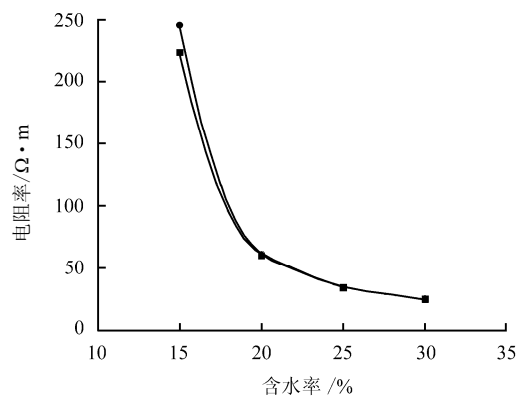


图4 不同灰土比条件下含水率与电阻率关系图  
Fig.4 Relationship between resistivities and water contents

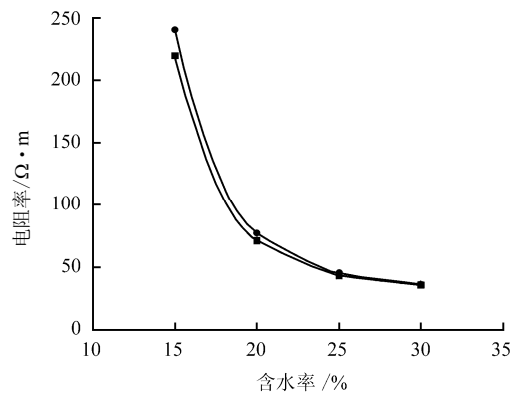
在 15 % 含水率时，电阻率比素土样高；当含水率为 30 % 时，电阻率低于素土样，而且掺量越大，电阻率曲线越低，这是由于电阻率的变化与土的离子浓度有关。在一定含水率下石灰与土混和后，增加了含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等的浓缩，这些带电离子在电场的作用下定向移动，产生电流，从而引起电阻率的变化。掺了石灰后，相同配比条件下，早期石灰更多的表现了它的物理效应(填充性)，所以离子浓度较低，并且由于填充效应，孔的连通性变差，因而电阻率在开始时较大。在后一阶段，掺石灰的土体则可能开始表现了它的化学效应(2 次反应)，由于它的 2 次反应，使得离子浓度相对来说略有增加，电阻率变化曲线越平缓最终小于素土的电阻。在相同含水率条件下，石灰掺量比例越大，混合土样的电阻率在早期变小，成反比，而后期成正比变大。

(2) 电阻率各向异性

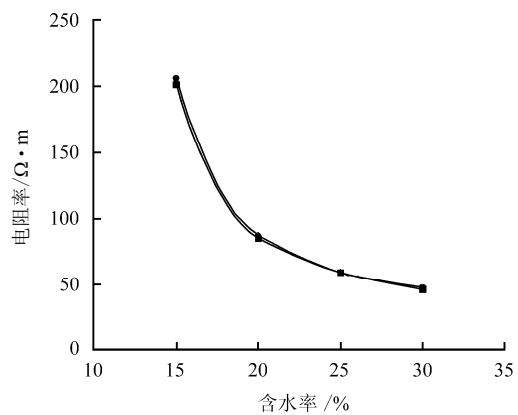
土样的电阻率还与土样的颗粒直径及颗粒排列方向有关<sup>[10]</sup>。图 5 显示了不同石灰配比的混合土样横向与纵向电阻率均随含水率的增大而减小，并且在同一较低含水率(15 %)下，不同配比灰土样的横向电阻率都比纵向电阻率大。



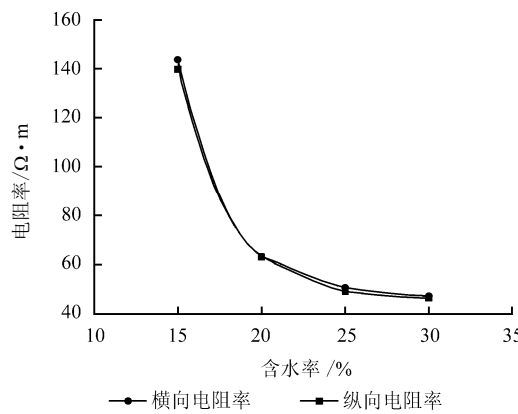
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 不同灰土比条件下含水率与横向纵向电阻率的关系  
Fig.5 Relationship between resistivities and water contents

这是由于土的结构、土颗粒的排列方向、土颗粒的形状等都影响土样的电阻率。同种类型的土，在孔隙液相同的情况下，电阻率与土颗粒的排列方向有关。图6表明给以同方向的电流，土颗粒方向与之垂直则电阻率可能高，土颗粒分散则电阻率可能低。因此，灰土样微结构，击实后产生排列方向的变化，颗粒的排列方向与横向测线相平行的居多。根据电流与水流的流向相反的说法(图6)<sup>[10]</sup>，可知横向电阻率必然大于纵向电阻率。

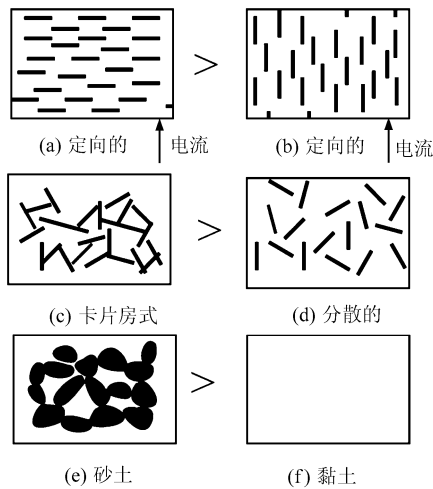


图6 土结构对竖直电流的影响<sup>[5]</sup>

Fig.6 Effects of soil structures on a vertical electrical flow

(3) 无侧限抗压强度

在不同石灰配比条件下，混合土样无侧限抗压强度与电阻率的关系如图7所示。从图7可以看出，随着电阻率的增加，无侧限抗压强度先是迅速增加；当电阻率达到  $50 \Omega \cdot m$  时，趋于平缓增加，当电阻率大于  $50 \Omega \cdot m$  时，无侧限抗压强度随之减小。

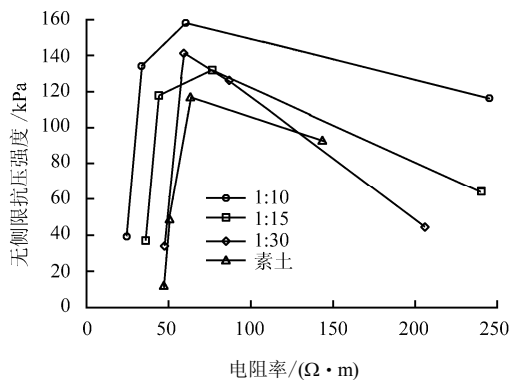


图7 无侧限抗压强度与电阻率的关系图

Fig.7 Relationship between resistivity and unconfined compression strength

(4) 饱和度、干密度、孔隙比

图8为饱和度、干密度、孔隙比与电阻率的关系图。由图8可知，随饱和度的增加，电阻率呈减小趋势，石灰配比越大，随着饱和度增加，电阻率下降越迅速，见图8(a)，呈负指数变化规律；电阻率随着干密度的增大而减小，在干密度小于  $1.45 g/cm^3$  时，电阻率下降迅速，之后趋于平缓下降，呈负指数变化规律，见图8(b)。

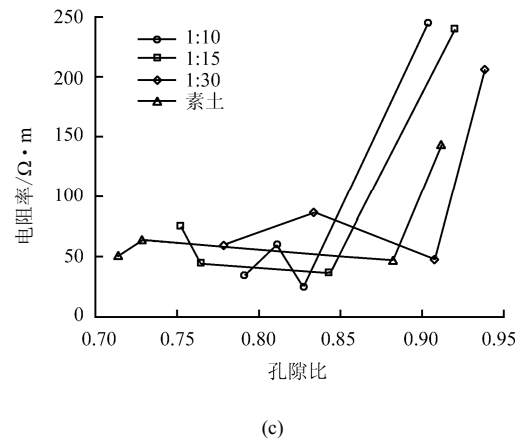
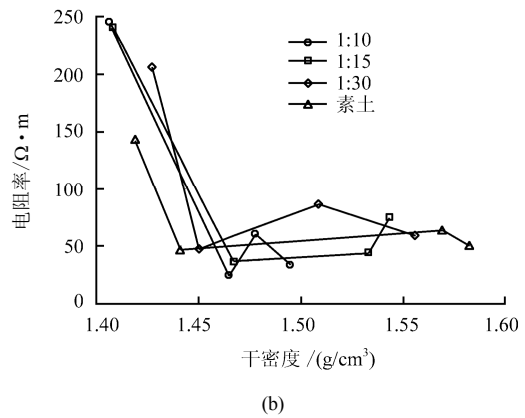
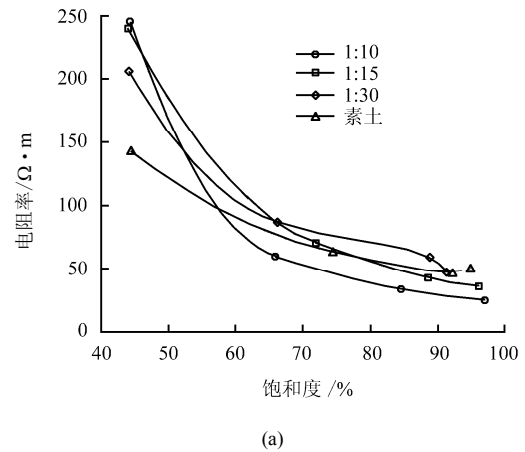


图8 饱和度、干密度和孔隙比与电阻率的关系  
Fig.8 Relationship between resistivity and saturation, dry density and void ratio

孔隙性是影响土电阻率大小的重要土体结构参数之一, 电阻率随孔隙比的关系见图 8(c), 随着孔隙比的增加, 电阻率先是平缓增加, 后当孔隙比增加至 0.83 % 后, 电阻率随着孔隙比的增加迅速增加, 呈负指数增大关系。土的孔隙比越小, 其孔隙的连通性越好, 孔隙水的连续性就越好, 导致孔隙水导电能力增加, 土的电阻率降低。

### 3.4 电阻率影响因素的敏感性分析

根据以上研究结果可知, 影响击实石灰土样的电阻率的因素很多, 下面利用正交试验方法, 分析电阻率影响因素的敏感性。

由于饱和度、干密度、孔隙比等因素都是根据含水率等因素计算得到的, 在敏感性分析时忽略, 只作含水率与石灰配比因素对于电阻率的敏感性分析(图 9)。由图 9 可知, 含水率对于电阻率的影响较敏感, 回归曲线分析表明含水率与电阻率呈指数关系, 见式(1), 相关系数  $R$  达到 0.96。

$$y = 902.46 e^{(-0.114 26x)}, R = 0.96 \quad (1)$$

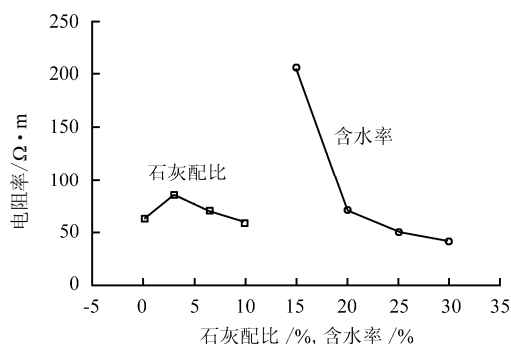


图 9 电阻率影响因素敏感性分析

Fig.9 Sensitivity analysis of resistivity acting factors

## 4 结 论

本文仅对灰土混合样电阻率进行室内试验研究, 并分析了掺石灰击实黏土的电阻率特性及其主要的影响因素, 为电阻率法用于路基施工质量控制提供理论依据, 其结论有如下几点:

(1) 电阻率随含水率的增加而减小。在低含水率(15%)时石灰配比大, 电阻率大; 高含水率(30%)时, 石灰配比大, 电阻率小。在相同含水率时, 竖向电阻率比横向电阻率大。

(2) 随着电阻率的增加, 无侧限抗压强度先是迅速增加, 后当电阻率达到  $50 \Omega \cdot m$  时, 趋于平缓增加; 当电阻率大于  $50 \Omega \cdot m$  时, 无侧限抗压强度随而减小。

(3) 随饱和度的增加, 电阻率基本呈减小趋势; 电阻率随着干密度的增大而减小; 随着孔隙比增加, 电阻率先平缓增加后迅速增加。

(4) 电阻率影响因素的敏感性分析表明含水率对于电阻率的影响较敏感。

## 参 考 文 献

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 陈克望. 膨胀土及其改良土的动力特性试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1993.
- [3] 韩会增. 南昆线膨胀岩(土)工程地质性质及土质改良[R]. 成都: 西南交通大学, 1991.
- [4] 中华人民共和国国家标准, GBJ145-90 土的分类标准[S]. 北京: [s.n.], 1991.
- [5] SAMGYU PARK, JUNGHO KIM. Geological survey by electrical resistivity prospecting in landslide area[J]. *Geosystem Engineering*, 2005, 8(2): 35-42.
- [6] TAMOTSU MATSUI. Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks[C]// Proceedings of An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, "GeoEng2000", Melbourne, Australia, Lancaster, PA: Technomic, 2000.
- [7] KALINSKI R J, KELLY W E. Electrical resistivity measurement for evaluating compacted-soil liners[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120 (2): 451-456.
- [8] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(5): 397-406.
- [9] 南京水利科学研究院, SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [10] FUKUE M, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements [J]. *Engineering geology*, 1999, 54: 43-53.