

DOI: 10.11779/CJGE201509017

# 水泥固化铅污染土的电阻率特性与经验公式

章定文<sup>1, 2</sup>, 曹智国<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>1, 2</sup>, 陈蕾<sup>3</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 苏州大学城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** 为探讨电阻率法在水泥固化重金属污染土性能评价中的应用潜能, 室内配制人工铅污染土, 采用水泥固化后测试其电阻率和无侧限抗压强度, 分析固化土电阻率的变化规律, 建立固化铅污染土的电阻率公式, 并探讨电阻率与无侧限抗压强度的相关关系。试验结果表明, 固化土电阻率随铅含量增大而减小, 随着水泥掺入量和养护龄期的增加而增大, 随着孔隙率和饱和度的减小而增大。提出了一个能够综合反映铅含量、水泥掺入量和养护龄期等因素对固化土电阻率影响规律的表征参数 $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$ , 用该参数替换 Archie 电阻率公式中的孔隙率, 得到了水泥固化重金属污染土的电阻率经验公式, 将 Archie 电阻率公式扩展应用到固化重金属污染土领域。固化土电阻率与强度之间近似服从幂函数关系。电阻率法是一种有效的重金属污染土固化效果评价方法, 且其具有快捷、无损等优势, 可推广应用。  
**关键词:** 铅污染土; 固化; 电阻率; 经验公式; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1685-07

**作者简介:** 章定文(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通岩土工程和环境岩土工程等方面的研究与教学工作。E-mail: zhangdw@seu.edu.cn。

## Characteristics and empirical formula of electrical resistivity of cement-solidified lead-contaminated soils

ZHANG Ding-wen<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-guo<sup>1,2</sup>, LIU Song-yu<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Nanjing 210096, China; 3. School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**Abstract:** In order to explore the application potential of electrical resistivity method in the field of solidified heavy metal-contaminated soils, the artificial contaminated soils with five different lead contents are solidified using cement, and then their electrical resistivities and unconfined compressive strengths after various curing periods are tested. The relationship between the electrical resistivity and unconfined compressive strength is discussed. The test results show that the cement hydration reaction results in an increase of the electrical resistivity of solidified samples, but the electrical resistivity decreases with the increase of after-curing porosity, degree of saturation and lead content. A key parameter  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$  ( $e$  is the Euler's number) is proposed to comprehensively reflect the effects of the lead content, cement hydration reaction and dense state of soils on the electrical resistivity of solidified soils. The Archie's electrical resistivity formula is extended to solidified heavy metal-contaminated soils by replacing the porosity by the key parameter. There is a power function relationship between the strength and the electrical resistivity while the lead content of solidified soils is certain. The electrical resistivity method can be used as a non-destructive, economical and continuous way to evaluate the quality of solidified heavy metal-contaminated soils.

**Key words:** lead-contaminated soil; solidification; electrical resistivity; empirical formula; unconfined compressive strength

## 0 引言

固化/稳定化技术是处理重金属污染土较为经济有效且常用的方法之一。该法是将污染土与水泥等胶结材料混合, 通过一系列的物理作用和化学反应减小重金属的淋滤特性, 从而达到环境保护的要求<sup>[1]</sup>。美国环境保护署将固化土的无侧限抗压强度和淋滤特性

作为评价固化/稳定化法处理效果的两个重要指标<sup>[2]</sup>。水泥固化重金属污染土的强度特性、变形特性和淋滤

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578148, 41330641, 51108288); 江苏省自然科学基金项目(BK2011618); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2242014R30020)

收稿日期: 2014-07-11

特性等已得到了较为深入系统的试验研究<sup>[3-5]</sup>, 固化/稳定化法的现场应用也在逐步开展<sup>[6-7]</sup>。在实际工程应用中, 污染土固化效果的现场检测是一个必不可少的环节, 目前较常用的方法是取芯测试<sup>[7]</sup>, 该方法的工作量较大, 因此探寻更加经济、有效、快捷的检测方法对该技术的推广应用具有重要意义。

电阻率法作为一种方便、快捷、无损且可连续测试的技术, 已在岩土工程现场检测领域越发受到重视<sup>[8]</sup>。电阻率作为岩土体的固有性质指标之一, 它能够表征土体的导电性, 其主要影响因素有土体的含水率、孔隙率、饱和度、孔隙溶液离子浓度和土体矿物成分等。对于天然土体或人工压实土而言, 电阻率能够反映土体的物理特性与力学性能<sup>[9-10]</sup>。对于水泥系固化材料而言, 电阻率的变化特征能够反映水泥水化的全过程<sup>[11]</sup>, 且上述电阻率的影响因素也是影响固化土微观结构特征和宏观力学特性的主要因素, 因此不少岩土工作者对水泥固化土的电阻率特性及其应用进行了探讨。Liu 等<sup>[12-13]</sup>分析了水泥土电阻率的变化规律, 并建立了水泥土电阻率与现场标贯击数和无侧限抗压强度之间的经验关系, 将电阻率法应用于水泥土搅拌桩桩身质量检测。Zhang 等<sup>[14]</sup>建立了水泥土电阻率经验公式。董晓强等<sup>[15]</sup>评价了碱性或酸性环境侵蚀作用下水泥土电阻率的变化规律。Zhang 等<sup>[16]</sup>还讨论了盐分对水泥土电阻率的影响规律, 给出了不同盐分含量下水泥土强度与电阻率的关系。Chen 等<sup>[17]</sup>采用电阻率测试技术对水泥固化铅污染土的水泥水化特性进行了分析, 指出电阻率法可以作为一种有效的水泥固化铅污染土性能评价方法。

在电阻率测试技术现场应用方面, Campanella 等<sup>[18]</sup>于 1990 年成功研制出一种电阻率静力触探头, 并将其应用于地下水污染状况的现场检测; 蔡国军等<sup>[8]</sup>采用电阻率静力触探技术对某农药厂污染场地的污染物分布和污染程度进行评价。另外, 固化重金属污染土淋滤特性的主要影响因素(如土体孔隙率、孔隙溶液重金属离子浓度和重金属的赋存形态等<sup>[19]</sup>)也是土体电阻率的主要影响因素。因此, 将电阻率法引入固化重金属污染土的机理分析及固化效果的现场检测评价等具有坚实的理论基础与技术设备保障。水泥固化土的电阻率已有不少的研究, 也建立了一些电阻率经验公式, 但固化重金属污染土的电阻率公式未见公开报道。

本研究人工配制铅污染土, 采用水泥固化后测试其电阻率和无侧限抗压强度, 分析固化土电阻率的影响因素与变化规律, 建立水泥固化重金属污染土电阻率公式, 并探讨了电阻率与强度的关系, 研究成果将为电阻率法在重金属污染土固化效果评价与性能检测中的应用提供理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的铅污染土是室内人工配置而成。土样由商品纯高岭土和商业黄砂按 15:85 的质量比混合而成。高岭土是由徐州夹河高岭土厂生产, 粒径小于 45 μm, 其主要物理性质指标见表 1。砂的比重为 2.68, 粒径小于 1 mm。高岭土和砂的级配曲线如图 1 所示。试验采用较低比例的高岭土(15%)是为了减小黏土颗粒表面电荷对电阻率测试的影响<sup>[20]</sup>。按照 ASTM D698-07 的标准击实试验方法测得混合土的最佳含水率为 10.0%, 最大干密度为 1.96 g/cm<sup>3</sup>。本试验所有试样的设计含水率均取值最佳含水率(10%)。

表 1 高岭土主要物理性质指标

Table 1 Physical properties of kaolin

含水率/%	比重	塑限/%	液限/%	黏粒含量/(% (<2 μm))	粉粒含量/(% (2~75 μm))
<1.5	2.72	32.0	68.0	20.0	80.0

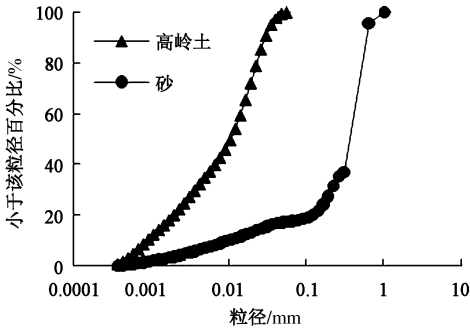


图 1 高岭土和砂的级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of kaolin and sand

试验采用硝酸铅作为铅污染源, 这是因为硝酸铅具有较高的溶解度, 且硝酸根离子对水泥水化反应的干扰较小<sup>[21]</sup>。根据中国城市工业场地铅含量的调研结果<sup>[22]</sup>, 本试验选用的典型铅含量(用  $w_{Pb}$  表示)分别为 0, 100, 1000, 10000, 30000 mg/kg, 即 0%, 0.01%, 0.1%, 1%, 3%的干土质量。

试验所用固化剂为普通硅酸盐水泥, 比重为 3.10。水泥掺入量(水泥质量与干土质量的比值, 用  $a_w$  表示)取 5%, 7.5%和 10%。

1.2 试样制备

根据土的设计含水率, 量取一定质量的去离子水, 用搅拌器将相应比例的硝酸铅试剂充分溶解于去离子水中, 得到相应铅离子含量的硝酸铅溶液。将烘干的混合土与相应比例的水泥充分搅拌, 加入配置好的硝酸铅溶液, 继续搅拌至均匀(搅拌时间约 10 min)。采用静压法将搅拌均匀的土料制成柱状固化土试样(直径 50 mm, 高度 100 mm), 控制试样干密度均为

混合土的最大干密度。脱模后将试样放入自封袋密封, 然后送入标准养护室(温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度在95%以上)养护。试样养护龄期( $T$ )分别为1, 7, 14, 28, 56和90 d。

### 1.3 测试方法

将养护至预定龄期的试样取出, 测试其直径、高度和质量, 然后测试试样的电阻率。电阻率测试仪由GWINSTEK公司生产, 其测试原理为二相电极法, 如图2所示。铜电极片的直径为50 mm, 厚度2 mm。为保证试样与铜电极片接触良好, 避免接触电阻对测试结果的影响, 电阻率测试时需在两个电极片上施加5 kPa的压力, 该压力对试样剪切强度的影响是可以忽略的。为避免土体极化效应和双电层松弛效应<sup>[23]</sup>对测试结果的影响, 电阻率测试频率宜选用2 kHz。所有试样在电阻率测试时, 温度均控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。试样的电阻率( $\rho$ )可由下式确定:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{A_s}{H}, \quad (1)$$

式中,  $\Delta U$  为试样两端的电压差,  $I$  为电流,  $A_s$  为试样的横截面积,  $H$  为试样高度。

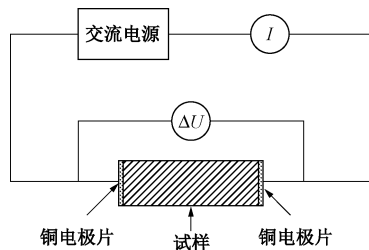


图2 电阻率测试原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-electrode probe method

电阻率测试完成之后进行无侧限抗压强度试验(强度用UCS表示), 其测试方法参见ASTM D2166-06, 加载应变速率为1%/min。无侧限抗压强度试验后取大块碎料测试试样养护后的含水率。

### 1.4 数据分析与整理

试样养护后的孔隙率( $n_t$ )和饱和度( $S_{\pi}$ )等参数可有下列公式计算:

$$n_t = \frac{e_t}{1 + e_t}, \quad (2)$$

$$S_{\pi} = \frac{\omega_t \cdot G_s}{e_t}, \quad (3)$$

$$e_t = \frac{(1 + \omega_t) G_s \gamma_w}{\gamma_t} - 1. \quad (4)$$

式中  $e_t$  为试样养护后的孔隙比, 由式(4)确定;  $\omega_t$  为试样养护后的含水率, 由实验室测得;  $\gamma_w$  为水的重度;  $\gamma_t$  为试样重度, 由电阻率测试前试样的质量和尺寸测试结果计算确定;  $G_s$  为固化土颗粒比重, 本文取

加固前混合土比重、水泥比重和硝酸铅比重按质量比例的加权平均值, 其中混合土比重由高岭土比重和砂比重按质量比例加权平均所得。由于本次试验中水泥掺入量较低, 水泥水化反应产物对土颗粒比重的影响有限, 因此可采用加权平均的方法近似计算固化土颗粒的比重<sup>[14]</sup>。

## 2 电阻率测试结果与分析

### 2.1 铅含量对固化土电阻率的影响

图3为水泥掺入量为7.5%时固化土电阻率的变化规律(水泥掺入量为5%和10%时的变化规律类似, 受篇幅限制, 文中没有列出)。由图可见, 与不含铅的试样相比, 固化土电阻率随着铅含量增加而减小。当铅含量较低(如0.01%)时, 试样的电阻率略有减小, 变化不明显, 但当铅含量较高(如1%或3%)时, 电阻率降低得尤为显著。铅离子对水泥固化土电阻率的影响主要表现在两个方面: ①离子本身具有导电性, 孔隙溶液中离子浓度越大, 其电导率越大<sup>[16-17]</sup>, 土体的电阻率则越小; ②铅离子含量较高时会对水泥水化具有一定的阻碍或延迟作用<sup>[3]</sup>, 进而会抑制固化土电阻率的发育状况。

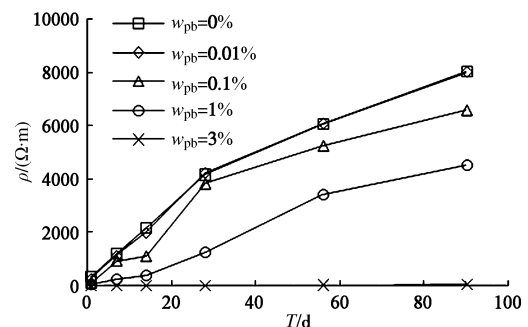


图3 固化土电阻率的变化规律 ( $a_w=7.5\%$ )

Fig. 3 Variation of electrical resistivity of samples ( $a_w=7.5\%$ )

由图3还可看出, 随着养护龄期增加, 固化土电阻率随之增大, 且其增大的速率逐渐变小。这是由于水泥的水化反应或火山灰反应会增大土体的电阻率<sup>[12, 14, 17]</sup>, 且该反应会随着龄期的增加而减缓。相同的养护龄期内, 铅含量越高时固化土电阻率增加的幅度越小, 特别是铅含量为3%时试样的电阻率增加甚少, 这也反映了铅离子对水泥水化反应的抑制作用。

### 2.2 水泥掺入量对固化土电阻率的影响

图4为铅含量等于1%时固化土电阻率随水泥掺入量的变化规律(其他铅含量时变化规律类似)。由图4可见, 随着水泥掺入量增加, 水泥水化反应加剧, 试样电阻率随之增大, 这与文献<sup>[12, 14, 17]</sup>的试验结果一致。

水泥由于其经济性而成为固化/稳定化技术最常

用的固化剂之一<sup>[3-5]</sup>,但是对于重金属污染程度较严重的土体,水泥的固化效果不太显著(如图3中铅含量为3%的试样),因此需研发添加剂或新型的固化剂来固化/稳定化高浓度的重金属污染土,以促进固化/稳定化技术的发展与推广应用。

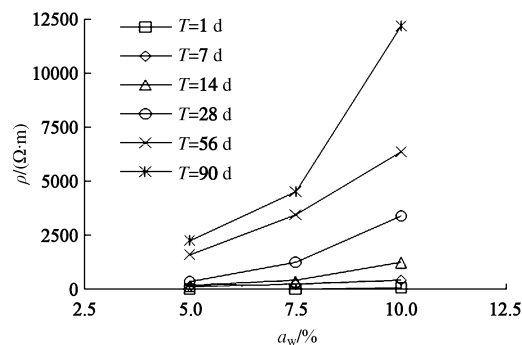


图4 电阻率随水泥掺入量的变化规律 ( $w_{pb}=1\%$ )

Fig. 4 Relationship between electrical resistivity and cement content ( $w_{pb}=1\%$ )

### 3 水泥固化铅污染土的电阻率公式

固化土的电阻率主要受孔隙溶液离子浓度和水泥水化反应程度影响,因此只要构建一个能够反映孔隙溶液离子浓度和水泥水化反应对电阻率影响的参数,即可建立固化铅污染土的电阻率公式。

#### 3.1 固化土电阻率与孔隙率的关系探讨

Archie 建立了饱和土体电阻率公式,并指出孔隙率( $n$ )是土体电阻率的控制参数<sup>[23]</sup>:

$$\frac{\rho}{\rho_w} = n^{-f}, \quad (5)$$

式中, $\rho$ 表示土体电阻率, $\rho_w$ 为孔隙水电阻率, $f$ 为经验参数,它反映土体内孔隙的连通程度。

固化土的电阻率随试样孔隙率的变化规律如图5所示。由图可见,铅含量一定时,固化土电阻率随孔隙率的降低而增加。对水泥固化土而言,水泥水化产物填充于土体孔隙,试样孔隙的连通程度降低,因此其电阻率随着试样孔隙率减小而增大。测试数据与 Archie 电阻率公式规律相似,但数据离散性较大,拟合效果不甚理想。这是由于 Archie 电阻率公式是基于未固化的饱和土体提出的,试样孔隙率不能完全反映水泥水化与胶结作用等对土体电阻率的影响<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 固化土电阻率与饱和度的关系探讨

Keller 等<sup>[24]</sup>指出饱和度是影响非饱和土电阻率的关键参数之一。图6为固化土的电阻率与试样饱和度的关系。水泥水化反应会消耗土体的水分,导致试样孔隙中液相的联通程度降低,试样电阻率随着饱和度降低而增大。由图6可见,铅含量一定时,固化土电

阻率与饱和度具有一定的相关关系,这也证实了 Keller 等的结论,但其相关性也较低,说明试样饱和度和不能有效反映水泥水化和孔隙溶液离子浓度对固化土电阻率的影响。

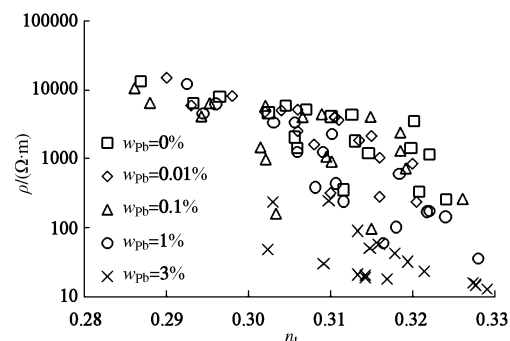


图5 固化土电阻率与孔隙率的关系

Fig. 5 Relationship between electrical resistivity and after-curing porosity

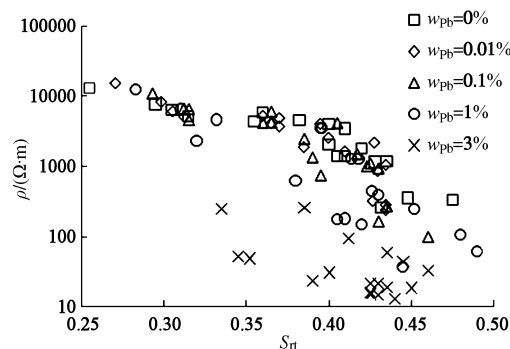


图6 固化土电阻率与饱和度的关系

Fig. 6 Relationship between electrical resistivity and degree of saturation

#### 3.3 水泥固化铅污染土电阻率经验公式

传统电阻率公式中的参数(如孔隙率、饱和度)均不能单独作为水泥固化铅污染土电阻率的表征参数,需结合固化土孔隙溶液离子浓度和水泥水化反应程度的影响因素(如铅含量、水泥掺入量和养护龄期等),才能够建立固化铅污染土电阻率公式。文献[14]在 Archie 电阻率公式的基础上,采用固化土孔隙率、水泥掺入量和龄期建立了水泥土(不含铅)电阻率经验公式,本次测试的固化土电阻率随着文献[14]中表征参数( $n_t/(a_w \cdot T^{0.5})$ )的变化规律如图7所示。由图7可见,铅含量一定时,固化土电阻率与  $n_t/(a_w \cdot T^{0.5})$  具有良好的相关关系,但不能反映铅含量的影响。因此,在文献[14]的基础上只要引入铅含量对电阻率的影响即可建立水泥固化铅污染土的电阻率公式。

对试验数据进行回归分析发现,  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$  ( $e$ 为常数)与固化土电阻率具有很好的幂函数关系,

如图 8 所示, 其相关系数可达 0.94, 这表明  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$  能够综合反映水泥掺入量、养护龄期和铅含量等因素对固化土电阻率的影响, 由此建立水泥固化重金属铅污染土的电阻率公式:

$$\rho = a \left[ (n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5}) \right]^{-b} \quad (6)$$

式中  $w_{pb}$  为铅含量 (%);  $a$  和  $b$  为经验参数,  $a$  主要反映土体孔隙几何特性,  $b$  值主要反映土体的胶结程度和孔隙连通程度。孔隙液体完全联通时,  $b=1.0$ 。已有学者给出了不同介质时  $b$  的取值, 如高岭土  $b=1.8$ , 伊利石  $b=2.11$ , 洁净砂  $b=1.3 \sim 1.6$ , 砂岩  $b=1.73$ , 含裂隙石灰岩  $b=1.2 \sim 1.3$  [25]。本文试验数据拟合得到  $a=2586.4$ ,  $b=1.475$ 。

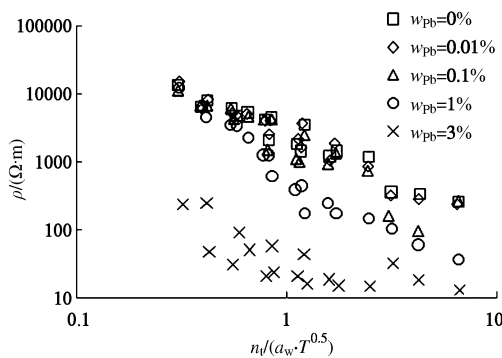


图 7 固化土电阻率与  $n_t/(a_w \cdot T^{0.5})$  的关系

Fig. 7 Relationship between electrical resistivity and  $n_t/(a_w \cdot T^{0.5})$

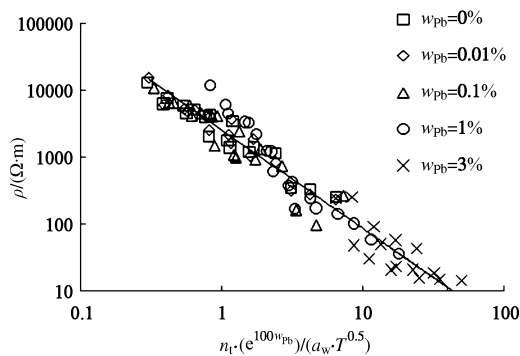


图 8 固化土电阻率与  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$  的关系

Fig. 8 Relationship between electrical resistivity and  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$

对比式 (5) 和式 (6) 可以发现, 本文构建的电阻率公式与 Archie 电阻率公式具有相同的形式。因此, 将 Archie 电阻率公式中的土体孔隙率  $n$  替换为  $(n_t \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$ , 即可将其扩展应用于水泥固化重金属污染土领域。式 (6) 可以称作修正的 Archie 水泥固化重金属污染土电阻率公式。当铅含量为 0 时, 公式退化到水泥固化土的电阻率公式 [14]。

需要指出的是, 式 (5) 等号两侧的量纲是均衡的, 而式 (6) 等号两侧具有不同的量纲, 仅为一个经验公

式, 即该公式仍存在缺陷, 有待进一步改进完善。

## 4 电阻率与无侧限抗压强度的关系

无侧限抗压强度是固化/稳定化技术处理效果的重要评价指标 [2]。图 9 为本试验所测得的固化土强度与电阻率的关系。由图可见, 铅含量一定时, 固化土强度与电阻率具有较好的相关关系。这是因为影响固化土强度的主要因素 (如水泥水化产物生成量和土体孔隙结构等) 也是固化土电阻率的主要影响因素, 因此, 固化土强度与电阻率具有相关性。但是当铅含量不同时, 固化土强度与电阻率相关关系具有一定的差异。铅的存在会影响水泥的水化反应, 因此影响固化土强度和电阻率, 另一方面, 固化土电阻率还取决于土体孔隙溶液的离子浓度, 铅含量不同会改变孔隙溶液的电阻率 [17]。铅对固化土强度和电阻率的影响机理并不完全一致, 因此固化土电阻率与强度的相关关系在铅含量不同时存在差异。

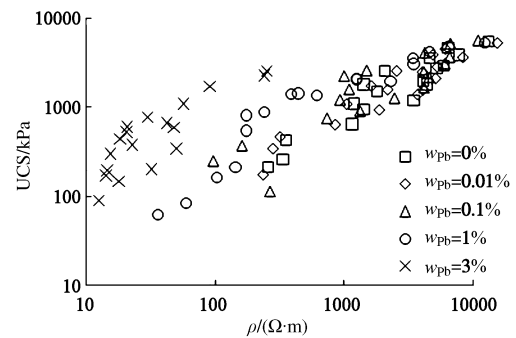


图 9 固化土电阻率与无侧限抗压强度的关系

Fig. 9 Relationship between electrical resistivity and unconfined compression strength

由图 9 可以看出, 铅含量一定时, 固化土强度与电阻率之间近似服从幂函数关系:

$$UCS = A\rho^B \quad (7)$$

式中,  $A$  和  $B$  均为拟合参数, 不同铅含量下的  $A$  值和  $B$  值见表 2。在本文的试验条件下,  $A$  值随着铅含量增加而增大。除铅含量为 3% 时,  $B$  值有一个略微的增大外,  $B$  值基本不随铅含量改变而变化。但由于数据有限,  $A$  和  $B$  取值与铅含量的关系有待进一步研究。

式 (7) 拟合相关系数均大于 0.75, 说明电阻率能够在很大程度上反映固化土的无侧限抗压强度性能。因此, 电阻率法可以作为一种固化土无侧限抗压强度现场间接评价方法, 且其具有快捷、无损等优势, 可推广应用。

在重金属污染土的固化/稳定化现场施工中, 固化剂与污染土的搅拌均匀程度是处治效果的保障措施之一。电阻率法可作为一种快捷的固化土搅拌均匀性现场评价方法 [13]。采用电阻率法还可检测污染土中重金

属含量与污染程度。随着固化土性能电阻率评价理论的日渐成熟，可以将电阻率法作为重金属污染土固化效果的评价方法。本文所提出的公式可为电阻率法应用于重金属污染土固化效果评价提供理论基础。

表 2 固化土强度与电阻率相关关系的拟合系数

Table 2 Fitting parameters between unconfined compression strength and electrical resistivity

铅含量/%	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
0	3.41	0.79	0.89
0.01	5.20	0.74	0.89
0.1	8.01	0.70	0.80
1	8.15	0.75	0.88
3	20.23	0.90	0.75

5 结 论

为探究电阻率法在固化重金属污染土性能评价中的应用潜能，本文分析固化土电阻率的影响因素与变化规律，建立固化重金属污染土的电阻率经验公式，并对电阻率与强度的关系进行探讨，得到如下主要结论：

- (1) 固化土电阻率随铅含量的增大而减小，随着水泥掺入量和养护龄期的增加而增大。
- (2)  $(n_i \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$  (*e* 为常数) 能够综合反映铅含量、水泥掺入量和养护龄期等因素对固化土电阻率的影响规律。
- (3) 将 Archie 电阻率公式中的土体孔隙率替代为  $(n_i \cdot e^{100w_{pb}})/(a_w \cdot T^{0.5})$ ，即可将其扩展应用于固化重金属污染土领域。
- (4) 固化土强度与电阻率之间近似服从幂函数关系，电阻率法可作为固化重金属污染土无侧限抗压强度的现场间接评价方法。

参考文献：

[1] CHEN Q Y, TYRER M, HILLS C D, et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review[J]. Waste Management, 2009, **29**(1): 390 – 403.

[2] United States Environmental Protection Agency. Solidification /stabilization use at superfund sites[R]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, 2000.

[3] 陈 蕾, 刘松玉, 杜延军, 等. 水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1898 – 1903. (CHEN Lei, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Unconfined compressive strength properties of cement solidified/ stabilized lead-contaminated soils[J]. Chinese

Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1898 – 1903. (in Chinese))

[4] JIANG N J, DU Y J, LIU S Y, et al. Experimental investigation of the compressibility behaviour of cement-solidified/ stabilized zinc-contaminated kaolin clay[J]. Géotechnique Letters, 2014, **4**(2): 27 – 32.

[5] 刘兆鹏, 杜延军, 蒋宁俊, 等. 基于半动态淋滤试验的水泥固化铅污染黏土溶出特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2212 – 2218. (LIU Zhao-peng, DU Yan-jun, JIANG Ning-jun, et al. Leaching properties of cement-solidified lead-contaminated clay via semi-dynamic leaching tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2212 – 2218. (in Chinese))

[6] AL-TABBAA A, EVANS C W, WALLACE C J. Pilot in situ auger mixing treatment of a contaminated site: Part 2. Site trial[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 1998, **131**(2): 89 – 95.

[7] AL-TABBAA A, BOES N. Pilot in situ auger mixing treatment of a contaminated site: Part 4. Performance at five years[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 2002, **155**(3): 187 – 202.

[8] 蔡国军, 邹海峰, 刘松玉, 等. 电阻率 CPTU 在某农药厂污染场地评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(5): 821 – 826. (CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, et al. Application of resistivity CPTU in evaluation of contamination site for pesticide factory[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(5): 821 – 826. (in Chinese))

[9] BRYSON L S, BATHE A. Determination of selected geotechnical properties of soil using electrical conductivity testing[J]. Geotechnical Test Journal, 2009, **32**(3): 1 – 10.

[10] RINALDI V A, CUESTAS G A. Ohmic conductivity of a compacted silty clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(10): 824 – 835.

[11] XIAO Lian-zhen, LI Zong-jin. New understanding of cement hydration mechanism through electrical resistivity measurement and microstructure investigations[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, **21**(8): 368 – 373.

[12] LIU Song-yu, DU Yan-jun, HAN Li-hua. Experimental study on the electrical resistivity of soil-cement admixtures[J]. Environmental Geology, 2008, **54**(6): 1227 – 1233.

[13] LIU Song-yu, ZHANG Ding-wen, ZHU Zhi-duo. On the uniformity of deep mixed soil-cement columns with electrical resistivity method[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2009, **188**: 140 – 149.

- [14] ZHANG Ding-wen, CHEN Lei, LIU Song-yu. Key parameters controlling electrical resistivity and strength of cement treated soils[J]. Journal of Central South University, 2012, **19**(10): 2991 - 2998.
- [15] 董晓强, 白晓红, 赵永强, 等. NaOH 污染下水泥土的电阻率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1715 - 1719. (DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Study on electrical resistivity of soil-cement polluted by NaOH[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1715 - 1719. (in Chinese))
- [16] ZHANG Ding-wen, CAO Zhi-guo, FAN Li-bin, 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.
- [17] CHEN L, DU Y J, LIU S Y, et al. Evaluation of cement hydration properties of cement-stabilized lead-contaminated soils using electrical resistivity measurement[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2011, **15**(4): 312 - 320.
- [18] CAMPANELLA R G, WEEMEES I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(5): 557 - 567.
- [19] PANDEY B, KINRADE S D, CATALAN L J. Effects of carbonation on the leachability and compressive strength of cement-solidified and geopolymer-solidified synthetic metal wastes[J]. Journal of Environmental Management, 2012, **101**: 59 - 67.
- [20] KOMINE H. Evaluation of chemical grouted soil by electrical resistivity[J]. Ground Improvement, 1997, **1**(2): 101 - 113.
- [21] BOARDMAN D J. Lime stabilization: clay-metal-lime interactions[D]. Loughborough: Loughborough University, 1999.
- [22] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 等. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 784 - 794. (LIAO Xiao-yong, CHONG Zhong-yi, YAN Xiu-lan, et al. Urban industrial contaminated sites: a new issue in the field of environmental remediation in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 784 - 794. (in Chinese))
- [23] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Petroleum Transactions of AIME, 1942, **146**(1): 54 - 62.
- [24] KELLER G, FRISCHKNECHT F. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. New York: Pergamon Press, 1966.
- [25] OH T, CHO G, LEE C. Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(11): 0601401211-1 - 06014012-5.