

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1099

水泥-粉煤灰固化/稳定重金属污染土的电阻率特性试验研究

查甫生¹, 刘晶晶¹, 许 龙¹, 邓永锋², 杨成斌¹, 储诚富¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 固化/稳定法修复重金属污染土固化机制的研究方法多基于力学测试和化学分析, 因而提出无损、快捷方便且经济有效的物理评价方法是当前亟待解决的关键问题。通过系统的室内试验, 利用电阻率法研究了水泥-粉煤灰固化重金属污染土的微观作用机制, 并建立了基于电阻率的固化铅污染土无侧限抗压强度预测模型。试验结果表明, 随着养护龄期的增加, 试样电阻率、孔隙水电阻率、结构因子、形状因子均显著增大, 而各向异性系数则随之减小。而增加重金属离子浓度, 电阻率、孔隙水电阻率以及平均形状因子明显减小, 各向异性系数 A 则逐渐增大。扫描电镜分析结果与电阻率参数变化规律吻合, 进一步验证了电阻率法揭示水泥-粉煤灰固化重金属污染土微观作用机制的可行性。此外, 电阻率与无侧限抗压强度之间存在良好的线性关系, 可作为评价固化土体力学性能的指标。

关 键 字: 重金属污染土; 固化/稳定法; 电阻率; 无侧限抗压强度; 微观机制

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)12-4573-09

Electrical resistivity of heavy metal contaminated soils solidified/stabilized with cement-fly ash

ZHA Fu-sheng¹, LIU Jing-jing¹, XU Long¹, DENG Yong-feng², YANG Cheng-bin¹, CHU Cheng-fu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Most of researches related to the immobilization mechanisms of stabilized/solidified heavy metal contaminated soils were depended on the mechanical tests and chemical analysis. Thus, proposing a physical method that is un-destructive, time-saving, convenient and cost-effective is the urgent issue to be solved currently. In this paper, a series of laboratory tests including electrical resistivity test was performed to investigate the microstructural mechanism of cement-fly ash stabilized heavy metal contaminated soils. Furthermore, the prediction model of unconfined compressive strength was established based on the electrical resistivity. The tests results presented that with increasing of curing time, electrical resistivity, pore water electrical resistivity, structure factor, as well as shape factor of the specimens increased, and the anisotropy coefficient decreased. While increasing the heavy metal ions concentration led to an obvious reduction in electrical resistivity, pore water electrical resistivity and shape factor, and the anisotropy coefficient increased gradually. The SEM results was consistent with that of the electrical resistivity, which confirmed the feasibility that revealing the microstructural mechanism of the stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils by electrical resistivity method. Finally, a good linear relationship between the electrical resistivity and unconfined compressive strength can be obtained. It is suggested that the electrical resistivity can be used as the index to evaluate the mechanical properties of the stabilized soil.

Keywords: heavy metal contaminated soils; solidification/stabilization; electrical resistivity; unconfined compressive strength; microstructural mechanism

1 引 言

固化/稳定法 (solidification/stabilization) 是一

种利用水泥、粉煤灰等固化剂将土体、污染物胶结为不可流动、结构完整的密实固体的污染土修复技术^[1-2]。该方法不仅能减小污染物的溶解性、迁移性

收稿日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41672306, No.41877262, No.41572280, No.41372281)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41672306, 41877262, 41572280, 41372281).

第一作者简介: 查甫生, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程与工程地质等方面的教学与科研工作。E-mail: zhafusheng@163.com

以及生物毒性,还能改善土体的工程性质^[3-5]。因此,在重金属污染土的处置中得到了广泛应用。目前,评价固化/稳定重金属污染土修复效果以及分析其固化机制的方法多基于力学测试和化学分析,然而这些方法具有耗时长、费用高以及对样品保存条件要求严格等缺点^[6-7]。因此,提出无损、快捷方便且经济有效的固化/稳定重金属污染土的物理评价方法是当前亟待解决的关键问题。

电阻率是土的固有物理性质参数之一,表征土体导电性能的强弱。在土的工程性质变化过程中,可同步跟踪、动态监测土体的电阻率变化规律,进而揭示土的物理化学反应等微观作用过程。早在1942年,Archie^[8]就建立了电阻率与土体结构之间的关系,提出结构因子的概念以及适用于纯净无泥质砂岩的经典电阻率公式。随后,电阻率法则被更广泛地运用到了岩土工程领域。Kowalczyk等^[9]通过室内试验建立了电阻率与无黏性土的密度和孔隙度之间的相关关系。Yim等^[10]利用电阻率法成功监测了水泥砂浆水化过程,并且确定了水泥水化初凝及终凝时间。Fukue等^[7,11]研究了土体污染对石英砂以及Kibushi黏土电阻率的影响。试验结果表明,增加无机盐及重金属离子浓度可增加土体导电性。然而,随着时间的增加,土体的导电性又随着重金属离子的迁移逐渐降低。

近年来,国内学者针对电阻率法在土体工程性质评价中的应用也进行了大量研究。查甫生等^[12-13]利用电阻率法评价了含水率变化对膨胀土和湿陷性黄土微结构特征的影响。Liu等^[14]对重塑水泥土以及原位水泥土搅拌桩的电阻率特性进行了试验研究。董晓强等^[15]验证了电阻率法检测水泥土搅拌桩施工质量的可行性,并指出电阻率与水泥土的强度、变形模量和渗透系数之间存在良好的线性关系。董晓强等^[16-17]还分别研究了水泥固化污染土以及污

水侵蚀对水泥土电阻率特性的影响。赵燕茹等^[18]进行了垃圾土电阻率特性试验研究。结果表明,利用电阻率测试,可监测垃圾填埋体中渗滤液的富集状态和运移途径,评价垃圾土内部结构的演化规律。储亚^[19]、刘松玉^[20]等建立了基于电阻率法的膨胀土膨胀性评价方法,探讨了油污染土的电阻率特性。章定文等^[21]研究了水泥固化铅污染土的电阻率特性,并提出了固化铅污染土的电阻率经验公式。综上所述,电阻率法在评价污染土或水泥土的工程性质等方面已得到广泛应用。然而,关于固化/稳定重金属污染土电阻率特性的研究,特别是基于电阻率法的固化污染土微观作用机制研究还鲜见报道。

因此,本文通过系统的室内试验,包括无侧限抗压强度试验、电阻率试验和扫描电子显微镜试验(SEM),探讨了养护龄期、重金属浓度及类型对固化土体电阻率特性的影响;利用电阻率参数的变化规律分析固化土体的微观作用机制;根据扫描电镜结果验证电阻率法揭示固化/稳定重金属污染土的微观作用机制的可行性;最后,建立基于电阻率的固化重金属污染土的强度预测公式,探讨其评价固化土体力学性能的可行性。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 试验用土

试验用土取自合肥市包河区某工地,取土深度4~5 m,土体呈黄褐色,硬塑状态。原状土基本物理性质指标如表1所示。

2.1.2 固化剂

试验所用固化剂包括:①商用水泥:矿渣硅酸盐水泥(P325);②粉煤灰:取自合肥市皖能电厂,为低钙粉煤灰。通过X射线荧光光谱分析对水泥和粉煤灰的化学成分进行分析,结果如表2所示。

表1 原状土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of undisturbed soil

密度/(g/cm ³)	含水率/%	相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)
1.92	25.5	2.669	49.4	24.8	24.6	21.2	1.663

表2 水泥、粉煤灰氧化物组分及相对含量

Table 2 Oxide component and relative content of cement and fly ash

固化剂名称	不同化学成分的含量/%								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	其他
水泥	43.798	27.209	9.895	3.013	2.880	1.565	0.468	0.442	1.850
粉煤灰	0.592	33.056	1.335	0.263	1.728	0.520	0.863	0.458	61.185

2.1.3 重金属污染物

本文的研究对象为水泥/粉煤灰固化铅、锌、铬 3 种污染土。由于硝酸根离子具有较高的溶解度(高阳离子活动性)且对固化反应过程的干扰较小,故选用硝酸铅($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)、六水合硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、九水合硝酸铬($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)作为重金属污染物。

2.2 试验方法

2.2.1 试样配合比设计

试样设计配合比如表 3 所示。重金属浓度为

1 000、5 000、10 000 和 15 000 mg/kg(分别用 M0.1、M0.5、M1.0 和 M1.5 表示);水泥掺量为 10%(用 C10 表示),粉煤灰掺量为 30%(用 F30 表示);试样养护龄期设计为 0、1、2、3、6、12 h 和 1、3、7、14、21、28、90 d。

2.2.2 试样制备

将土和固化剂放入 105 °C 的烘箱内,烘干 24 h,取出。碾碎,土样过 2 mm 标准筛,水泥和粉煤灰过 0.5 mm 标准筛。

①根据设计配合比,以及击实试验所得最优含

表 3 试样配合比设计
Table 3 The composition of specimens

重金属类型	重金属浓度/(mg/kg)	水泥掺量/%	水泥/粉煤灰掺量/%	养护龄期
Pb	1 000、5 000、10 000、15 000	10	10+30	0 h、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h、1 d、3 d、7 d、14 d、21 d、28 d、90 d
Zn	1 000、5 000、10 000、15 000	10	10+30	28 d
Cr	1 000、5 000、10 000、15 000	10	10+30	28 d

水率,分别称量试验所需的土样、污染物、固化剂和蒸馏水备用;②将所称量的土样、重金属污染物和蒸馏水充分混合,搅拌均匀,制备污染土,并放置在塑料袋中密封保存 24 h;③将称取的固化剂与制备的污染土充分搅拌混合,用于制备固化污染土样;④根据击实试验所得最大干密度的 95%,采用击实法制备尺寸为 $\Phi 6.18 \text{ cm} \times H2 \text{ cm}$ 的环刀样和 $\Phi 3.91 \text{ cm} \times H8 \text{ cm}$ 的柱状试样;⑤最后,将制备好的土样用保鲜袋密封,放入标准养护箱(温度 $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度 $(95 \pm 2)\%$) 养护至设计养护龄期。

2.2.3 无侧限抗压强度试验

根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[22]对柱状试样进行无侧限抗压强度试验。

2.2.4 扫描电子显微镜 (SEM)

扫描电子显微镜测试要求试样自然风干,样品尺寸约为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的立方体,并用毛刷将试样表面的浮土扫净。

3 电阻率测试原理及方法

3.1 测试原理

根据欧姆定律,将测得的固化重金属污染土的电阻 R ,通过式 (1) 换算成电阻率 ρ ^[23]:

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (1)$$

式中: S 为电极片与土样之间的接触面积 (m^2); L 为两个电极片之间的距离 (m)。

由于试验用土具有明显的各向异性,因此,本文对其进行了水平向和竖向电阻率测试。根据测得的横、竖向电阻率以及孔隙液电阻率,计算平均电阻率 $\bar{\rho}$ 、孔隙水电阻率 ρ_w 、平均结构因子 $\bar{F}$ 、平均形状因子 $\bar{f}$ 以及各向异性系数 A 。计算公式如式 (2) ~ (5) 所示^[8, 24]。

$$\bar{\rho} = \frac{2\rho_H + \rho_V}{3} \quad (2)$$

$$\bar{F} = \frac{2F_H + F_V}{3} \left(F_V = \frac{\rho_V}{\rho_w}, F_H = \frac{\rho_H}{\rho_w} \right) \quad (3)$$

$$\bar{f} = n^{-\bar{F}} \quad (4)$$

$$A = \sqrt{\frac{F_V}{F_H}} \quad (5)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为土的平均电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); ρ_H 为土的水平电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); ρ_V 为土的竖向电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); $\bar{F}$ 为土体平均结构因子 (F_V 为竖向结构因子, F_H 为水平结构因子); ρ_w 为孔隙水电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); $\bar{f}$ 为平均形状因子; n 为土体孔隙率; A 为土体的各向异性系数。

3.2 测试方法

试验采用两相电极交流电,高频 2 000 Hz 对环刀样以及孔隙溶液进行电阻率测试。电阻率仪采用台湾固纬 LCR-816 电阻率测试仪。

3.2.1 平均电阻率

将完成养护的环刀样侧面对称削平,准备两组

铜片, 一组剪成与试样顶、底面形状、大小相同; 另一组与被削平的两个侧面形状、大小相同。测量时, 将两组铜片放置在与之形状相同的土样的一面。为了使铜片与土样充分接触, 还要在上侧的铜片之上施加 5 kPa 的荷载 (由于水泥土的强度相对较高, 5 kPa 的荷载不会对水泥土的结构造成损伤)。由此, 可测得试样的竖向电阻率以及水平向电阻率, 从而计算出平均电阻率。

3.2.2 孔隙水电阻率

孔隙水电阻率测试参考了陈蕾推荐的方法^[23]。将土样烘干、碾碎。将土样与蒸馏水以 1:5 的质量比混合, 并持续搅拌 30 min。然后将悬浊液倒入聚乙烯瓶中, 静置 2 h。最后, 测试上清液电阻率, 即为孔隙水电阻率。

4 试验结果与分析

4.1 养护龄期对电阻率的影响

图 1 为 C10 和 C10+F30 固化 Pb0.1、Pb0.5、Pb1.0 和 Pb1.5 污染土的平均电阻率随养护龄期的变化曲线。

由图 1 可知, 养护初期 (≤ 7 d), 固化 Pb 污染土的电阻率变化幅度较小; 养护 7~28 d 时, 电阻率开始随着养护龄期的增加而逐渐增大; 而养护龄期超过 28 d 后, 电阻率的增长速率明显加快。

当 Pb^{2+} 浓度较低时, 水泥固化试样在养护 1 d 后, 其电阻率显著增加; 在 Pb^{2+} 浓度较高时, 水泥固化土在养护 14 d 后逐渐增大。证明高浓度 Pb^{2+} 的存在延迟了水泥水化反应。

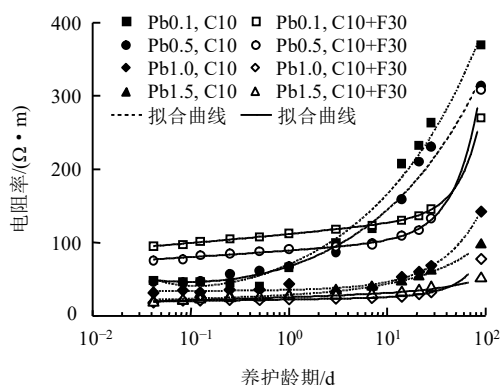


图 1 养护龄期对固化铅污染土电阻率的影响

Fig.1 Effects of curing time on electrical resistivity of stabilized Pb-contaminated soil

4.2 重金属离子浓度及类型对电阻率的影响

图 2 是重金属离子浓度对 C10 和 C10+F30 固化不同类型污染土电阻率的影响。

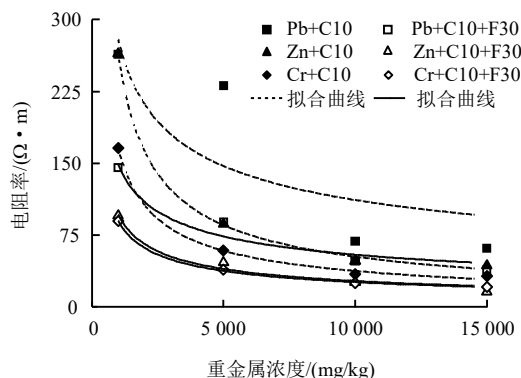


图 2 电阻率与重金属离子浓度的关系

Fig.2 Relationship between electrical resistivity and heavy metal ions concentration

由图 2 可知, 随着重金属离子浓度的增加, 固化试样的电阻率逐渐减小。而经 C10 和 C10+F30 固化后, 3 种类型重金属污染土电阻率大小也不尽相同, 排序为: 固化 Pb 污染土 > Zn 污染土 > Cr 污染土。

4.3 固化机制

4.3.1 基于电阻率参数的讨论

文献[25]提出, 土体的导电路径包括固体颗粒和孔隙水溶液。在水化反应的初始阶段, 土体中存在两种反应过程: ①与水接触后, 水泥/粉煤灰中 OH^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等逐渐溶出到土体孔隙溶液中; ②早期水化产物 (如钙矾石、氢氧化钙等) 的形成消耗孔隙溶液中游离的离子, 并填充试样孔隙。前者可使试样电阻率降低, 后者则使电阻率增大。两者的相互作用导致养护初期试样电阻率变化幅度较小。

图 3 为固化铅污染土各项电阻率参数与养护龄期的关系曲线。由图可知, 随着养护龄期的增加, 固化 Pb 污染土的孔隙水电阻率 ρ_w 、平均结构因子 $\bar{F}$ 和平均形状因子 $\bar{f}$ 均随之增大, 各向异性系数 A 减小。孔隙水电阻率 ρ_w 增大, 说明孔隙溶液中部分游离态的离子在水泥/粉煤灰水化反应过程中参与反应。其中, Ca^{2+} 在水泥/粉煤灰提供的碱性环境中形成 CSH 胶体及 $Ca(OH)_2$ 晶体等导电性较差的物质, 而 Pb^{2+} 则以沉淀、吸附、包裹或同晶置换等形式被水化产物固定, 亦降低了孔隙液导电性。平均结构因子 $\bar{F}$ 的变化则反映出固化试样内部固体颗粒的结构特征, 平均结构因子 $\bar{F}$ 越大说明试样的固相电阻率越大。其原因是随着养护龄期的增加, 水化反应的持续进行, 从而导致 CSH、CAH 等水化产物生成量增多。在水化产物的胶结作用下, 试样

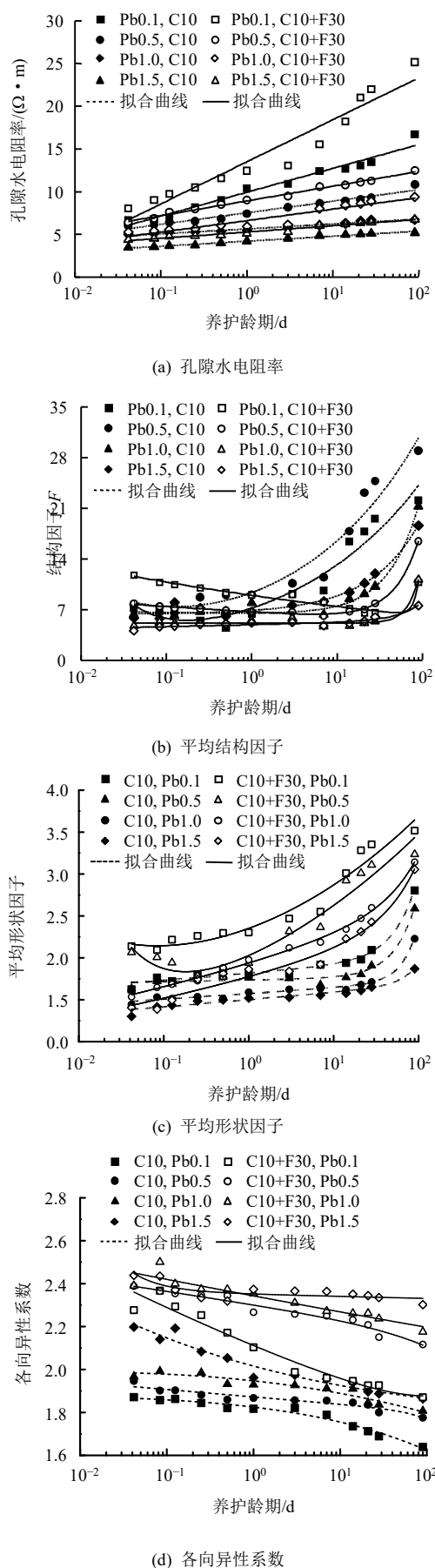


图 3 养护龄期对固化铅污染土电阻率参数的影响
Fig.3 Effects of curing time on electrical resistivity parameters of stabilized Pb-contaminated soil

内部土颗粒逐渐团聚, 同时孔隙体积减小, 减少土体导电路径。而平均形状因子 $\bar{f}$ 的变化则进一步证明了, 养护龄期的增加使得颗粒间的胶结程度逐渐增大。

图 4 为固化铅污染土各项电阻率参数与重金属浓度的关系曲线。由图可知, 固化试样的孔隙水电阻率 ρ_w 和平均形状因子 $\bar{f}$ 随着重金属离子浓度增加而减小, 各向异性系数 A 随之增大, 而平均结构因子 $\bar{F}$ 则无明显变化规律。

前文指出, 孔隙液导电性主要由其所含离子溶度以及离子所带电荷量控制。离子浓度越高, 及其所带电荷量越多, 溶液的导电性越好, 其电阻率越小。因此, 孔隙液电阻率 ρ_w 的降低说明孔隙溶液中游离态的金属离子浓度增加。平均形状因子 $\bar{f}$ 减小, 证明增加重金属离子浓度破坏了水化产物对固体颗粒的胶结作用。此外, 尽管 Pb^{2+} 的存在不会影响 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CSH 的形成, 但对 CAH 的形成有严重的阻碍作用^[26-27]。而 Pb^{2+} 在水泥和粉煤灰提供的强碱性环境中还可形成 $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 沉淀, 包裹在还未反应的固化剂颗粒表面, 阻碍水化反应的发展。增加 Zn^{2+} 浓度导致电阻率降低, 是因为 Zn^{2+} 的存在阻碍了 C_3S 和 C_2S 的水化反应, 导致水化产物生成量降低。而 Cr^{3+} 的加入可置换出水化产物中的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 和 Fe^{3+} 等, 并且 Cr^{3+} 的氧化物还可与水泥浆反应, 从而影响固化试样的早期硬化, 破坏固化试样的结构致密性。因此, 随着重金属离子浓度的增加, 固化试样电阻率 ρ 逐渐减小。

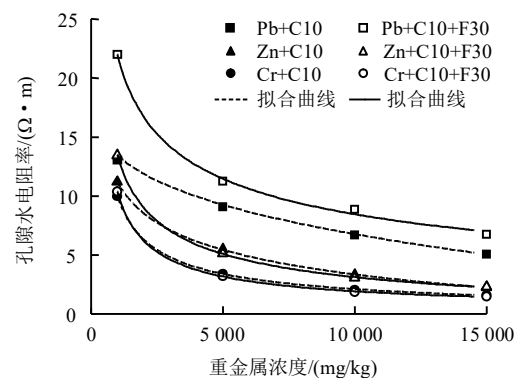
4.3.2 基于微观结构特征的讨论

图 5 为 C10+F30 固化不同浓度 Zn 污染土在养护 7 d 和 90 d 时的微结构图像。

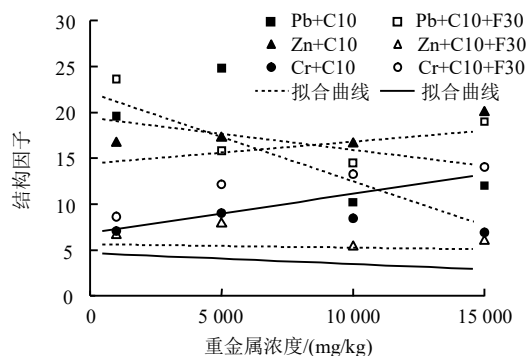
比较图 5(a)和图 5(b)可知, 养护 7 d 的试样中, 水化物生成量较少, 土体中存在较大孔隙。随着养护龄期的增加, 土体中生成针状或棒状的钙矾石和纤维状的水化硅酸钙。这些水化产物的出现填充了大量孔隙, 并将土颗粒逐渐团聚, 使土体结构更加密实。

如图 5(c)所示, 当 Zn^{2+} 浓度增加到 10 000 mg/kg 时, 试样中水化产物的生成量明显减少, 有无定型化合物形成, 且固体颗粒的胶结程度降低。说明 Zn^{2+} 浓度的增加阻碍了水泥/粉煤灰的水化反应, 并对水化产物的结构具有一定的破坏作用。

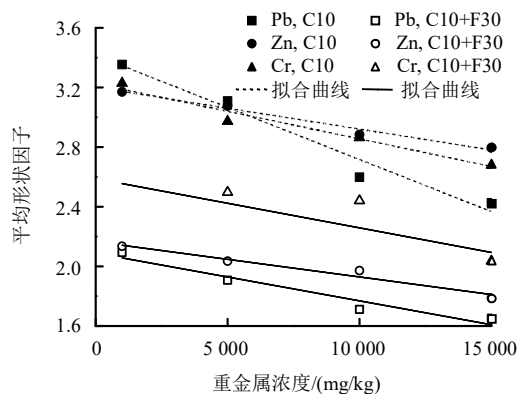
综上所述, 固化试样的微结构特征与其电阻参数随养护龄期及重金属离子浓度的变化规律一致。因此可证明, 利用电阻率法揭示水泥/粉煤灰固化重金属污染土的微观作用机制是可行的。



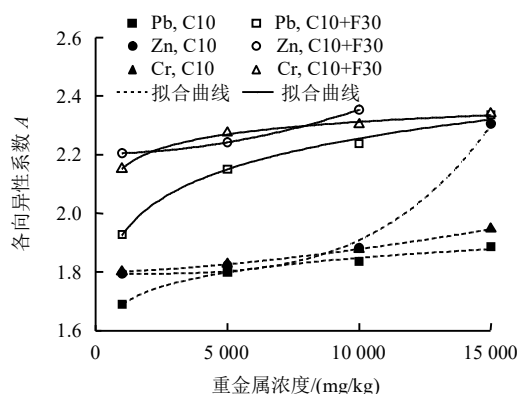
(a) 孔隙水电阻率



(b) 平均结构因子

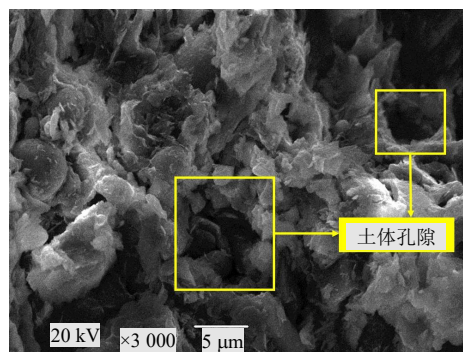


(c) 平均形状因子

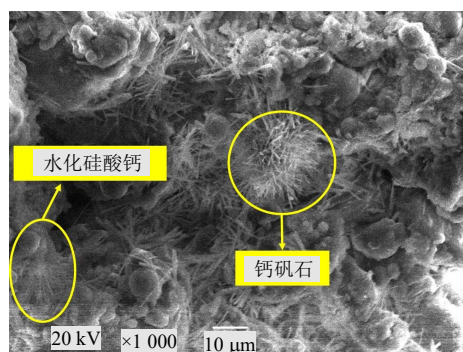


(d) 各向异性系数

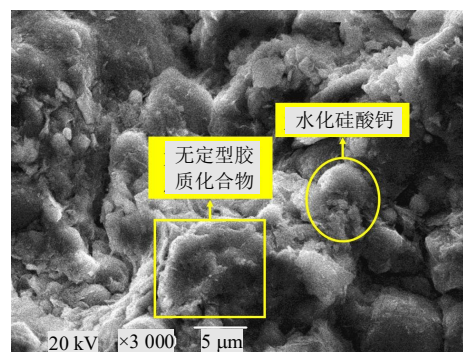
图4 重金属浓度及类型对固化铅污染土电阻率参数的影响
Fig.4 Effects of heavy metal concentration and species on electrical resistivity parameters of stabilized Pb-contaminated soil



(a) Zn0.1, C10+F30, 养护 7 d



(b) Zn0.1, C10+F30, 养护 90 d



(c) Zn1.0, C10+F30, 养护 90 d

图5 固化 Zn 污染土的微结构图像

Fig.5 Graphs of the micro-structure of solidified zinc contaminated soil

4.4 平均电阻率与无侧限抗压强度的关系

图6是不同养护龄期的C10和C10+F30固化不同浓度铅污染土的无侧限抗压强度与电阻率的关系曲线。

由图6可知,试样的无侧限抗压强度随电阻率增加而增大。通过拟合可知,无侧限抗压强度与电阻率呈指数函数关系:

$$q_u = A\rho^B + C \quad (6)$$

式中: q_u 为无侧限抗压强度 (MPa); ρ 为电阻率 ($\Omega \cdot m$); A 、 B 和 C 表示与 Pb^{2+} 浓度相关的系数,无量纲。

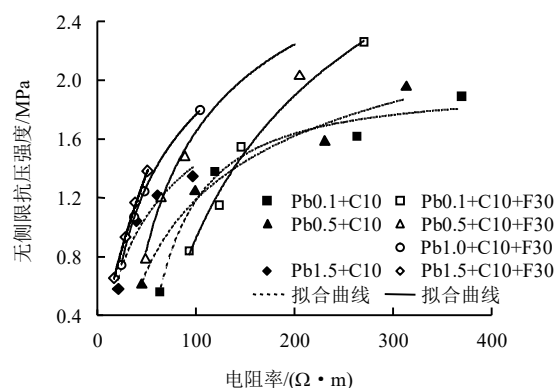


图 6 平均电阻率与无侧限抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between electrical resistivity and unconfined compressive strength

为了简化该强度预测公式, 进一步对所获得试验结果进行归一化处理, 分别求取 q_u / q_{u_0} 和 ρ / ρ_0 的大小, 获得 q_u / q_{u_0} 与 ρ / ρ_0 的关系如图 7 所示。从图可以看出, q_u / q_{u_0} 与 ρ / ρ_0 呈线性关系:

$$q_u / q_{u_0} = 0.418 \rho / \rho_0 + 1.082, R = 0.895 \quad (7)$$

通过式 (7), 即可根据试样电阻率测试来预测养护后的固化污染土的无侧限抗压强度。

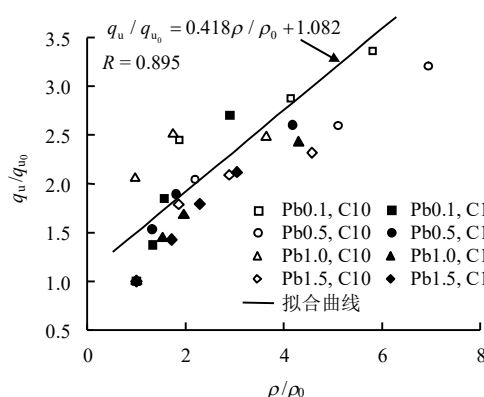


图 7 固化污染土的无侧限抗压强度预测模型

Fig.7 Prediction model of unconfined compressive strength

5 结 论

本文通过电阻率试验、无侧限抗压强度试验以及微结构分析, 研究了水泥/粉煤灰固化重金属污染土的电阻率特性, 利用电阻率参数的变化规律揭示固化土体的微结构作用机制, 并建立了基于电阻率的固化污染土无侧限抗压强度预测模型。所得主要结论如下:

(1) 随着养护龄期的增加, 固化重金属污染土的电阻率、孔隙水电阻率、结构因子以及形状因子均显著增大, 而各向异性系数则随之减小。

(2) 增加重金属离子浓度, 试样的电阻率、孔

隙水电阻率以及形状因子明显减小, 各向异性系数则逐渐增大; 而改变重金属离子类型也导致试样电阻率参数间存在差异, 大小顺序为: 固化 Pb 污染土 > Zn 污染土 > Cr 污染土。

(3) SEM 结果指出, 养护初期 (7 d), 土体中存在较大孔隙, 水化反应不充分; 随着养护龄期的增加 (90 d), 有大量水化产物 (水化硅酸钙、钙矾石) 形成并填充孔隙, 土体胶结程度增强; 而增加锌离子浓度则导致水化产物生成量明显减少。

(4) 固化试样的微结构特征与电阻率参数的变化规律一致, 进一步验证了电阻率法揭示固化/稳定重金属污染土微观作用机制的可行性。

(5) 建立了基于电阻率的固化重金属污染土无侧限抗压强度的归一化预测公式, 可用于评价固化土体的强度特性。

参 考 文 献

- [1] 张帆, 蒋宁俊. 土壤重金属污染的工程危害及修复方法[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(4): 58—60.
ZHANG Fan, JIANG Ning-jun. Review of hazards induced by soil contamination of heavy metals and remediation technique[J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2010, 22(4): 58—60.
- [2] 郝汉舟, 陈同斌, 靳孟贵, 等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 816—824.
HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, JIN Meng-gui, et al. Recent advance in solidification /stabilization technology for the remediation of heavy metals contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 816—824.
- [3] DU Y J, WEI M L, REDDY K R, et al. Effect of carbonation on leachability, strength and microstructural characteristics of KMP binder stabilized Zn and Pb contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1033—1042.
- [4] YOOBANPOT N, JAMSAWANG P, HORPIBULSUK S. Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 141: 146—156.
- [5] DU Y J, WEI M L, REDDY K R, et al. New phosphate-based binder for stabilization of soils contaminated with heavy metals: leaching, strength and microstructure characterization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 179—188.

- [6] 王玉玲. 重金属污染场地电阻率法检测数值模拟及反演研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- WANG Yu-ling. Study on numerical simulation and inversion of electrical resistivity method for heavy metal contaminated sites[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [7] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. **Engineering Geology**, 2001, 60(1): 361—369.
- [8] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics[J]. **Transactions of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering**, 1942, 146: 54—61.
- [9] KOWALCZYK S, MAŚLAKOWSKI M, TUCHOLKA P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2014, 110: 43—50.
- [10] YIM H J, LEE H, KIM J H. Evaluation of mortar setting time by using electrical resistivity measurements[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 146: 679—686.
- [11] FUKUE M, INOUE T, FUJIMORI Y, et al. Resistivity change during transport of heavy metal in sand[J]. **Engineering Geology**, 2006, 85(1): 46—52.
- [12] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率法的膨胀土吸水膨胀过程中结构变化定量研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1832—1839.
- ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative research on microstructures of expansive soils during swelling using electrical resistivity measurements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1832—1839.
- [13] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1692—1698.
- ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative assessment on change in microstructure of loess during collapsing using electrical resistivity measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1692—1698.
- [14] LIU S Y, DU Y J, HAN L H, et al. Experimental study on the electrical resistivity of soil-cement admixtures[J]. **Environmental Geology**, 2008, 54(6): 1227—1233.
- [15] 董晓强, 宋志伟, 张少华, 等. 水泥土搅拌桩芯样电阻率特性的应用研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 88—94.
- DONG Xiao-qiang, SONG Zhi-wei, ZHANG Shao-hua, et al. Application study of electrical resistivity characteristics of core samples from soil-cement mixing piles[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(10): 88—94.
- [16] 董晓强, 张少华, 苏楠楠, 等. 污染土对水泥土强度和电阻率影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 91—98.
- DONG Xiao-qiang, ZHANG Shao-hua, SU Nan-nan, et al. Effects of contaminated soil on electrical resistivity and strength of cemented soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(4): 91—98.
- [17] 董晓强, 苏楠楠, 黄新恩, 等. 污水浸泡对水泥土强度和电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1855—1862, 1870.
- DONG Xiao-qiang, SU Nan-nan, HUANG Xin-en, et al. Effect of sewage on electrical resistivity and strength of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1855—1862, 1870.
- [18] 赵燕茹, 陈湘生, 黄力平, 等. 垃圾土电阻率特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2205—2216.
- ZHAO Yan-ru, CHEN Xiang-sheng, HUANG Li-ping, et al. Experimental study on electrical resistivity of municipal solid waste[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(12): 2205—2216.
- [19] 储亚, 查甫生, 刘松玉, 等. 基于电阻率法的膨胀土膨胀性评价研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 157—164.
- CHU Ya, ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, et al. Evaluation of expansibility of expansive soil using resistivity method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 157—164.
- [20] 刘松玉, 边汉亮, 蔡国军, 等. 油水二相体对油污染土电阻率特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 170—177.
- LIU Song-yu, BIAN Han-liang, CAI Guo-jun, et al. Influences of water and oil two-phase on electrical resistivity of oil-contaminated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(1): 170—177.