

含水率及压实度对酸碱污染重塑黄土的 电阻率特征影响试验研究

刘 华^{1,2}, 胡文乐^{1,2}, 王铁行^{1,2}, 牛泽林^{1,2}, 谷宏全¹, 胡鹏飞¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为查明孔隙水化学环境对 Q₃ 黄土的电阻率与其影响因素之间的相互联系, 通过模拟酸碱溶液对不同压实度的 Q₃ 黄土进行污染, 并利用伏安法电阻率测试装置分析不同污染类型(酸、碱)、不同含水率、不同污染浓度等在不同压实度下的黄土试样的电阻率演变特征。实验结果表明: 污染黄土的电阻率随含水率增加而呈幂指数减小, 含水率增加至阈值后电阻率基本恒定; 同等污染浓度下酸污染土电阻率大于碱污染土电阻率; 污染黄土的电阻率随着污染浓度、压实度增加而逐渐降低。最后基于污染土电阻率随含水率降低的幂函数模型, 分别建立了酸碱污染土电阻率与含水率、污染浓度、压实度间的协同联系。试验结果可为污染黄土场地的勘察、工程评价和改造治理提供数据支撑和理论依据。

关键词: 重塑黄土; 酸碱污染; 电阻率特性; 定量评价

中图分类号: TU47; U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0337-07

Experimental research on the resistivity characteristics of contaminated remolded Q₃ loess by water content and compaction degree

LIU Hua^{1,2}, HU Wenle^{1,2}, WANG Tiehang^{1,2}, NIU Zelin^{1,2}, GU Hongquan¹, HU Pengfei¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to ascertain the interaction between the resistivity of polluted remodeled Q₃ loess and its influencing factors, the paper utilized a simulated acid-based solution to contaminate Q₃ loess in laboratory tests, and analyzed the resistivity change of the loess samples of different compaction degree with the self-developed voltammetry resistivity test device from the aspects of the different types of pollution (Acid, alkali), different water content, different pollution concentration, etc. The results show: the resistivity of the contaminated soil decreases exponentially as the water content increases; when the water content increases to the threshold value, the resistivity change rate remains constant; the resistivity of acid-contaminated soil is greater than that of alkali-contaminated soil at the same pollution concentration. The resistivity of acid-base contaminated soil gradually decreases with the increase of pollution concentration and compaction degree. At the same time, based on the power function model that the resistivity decreases with the water content reduction of the contaminated soil, the synergy relationship formula between the resistivity of the acid-alkali contaminated soil and the water content, pollution concentration and compaction degree is established respectively.

Key words: remodeled loess; acid-base pollution; resistivity characteristics; quantitative evaluation

黄土特有的颗粒组成和空间结构体系, 对其自身工程力学性能有着极其重要的影响^[1-3], 其内在致灾机理和工程病害问题一直以来都受到工程师和相关学者的重视和关注^[4-5]。建在黄土场地的各种建(构)筑物及线路工程常常面临着由于降雨入渗、污水排放不当等原因诱发的不同地基破

坏^[3,5]。有关黄土的力学和工程特性演变结果仍是当前西部经济发展和东部经济结构布局转换的重难点问题。其次, 在东西部联动产业转移和工业化不断推进的过程中, 置换出大量严重污染场地, 其中潜存的工业废液对场地环境安全和再开发利用提出了更高的要求。当黄土受到工业废液中的

收稿日期: 2020-09-21

修改稿日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608436); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ5003); 陕西省教育厅自然科学专项研究计划(18JK0478)

第一作者: 刘 华(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程方面的教学和研究工作。E-mail: liuhua029@xauat.edu.cn

酸碱污染源侵入后,引发物理力学指标发生显著改变,同时导致土体工程性质发生复杂变化^[5],进一步严重影响了工程建设的质量和进度.随着新兴地球物理方法的蓬勃发展,为工程场地的勘察、建设、评价和地基路基的病害诊断反演等提供了便利.土体遭受污染液侵蚀后电阻率会产生显著变化,改变了土—水—化学耦合的结果,对利用电阻率法判定场地土层工程性质的准确度及灵敏度造成极大的影响.分析污染前后土体电阻率之间的变化规律和结果,对利用电阻率变化判断土体污染程度及修正污染导致的电阻率评价场地工程性质指标的误判具有重要的意义.

已有研究表明,土体的电阻率主要由含水率、孔隙率、土质特征及孔隙溶液成分等多因素决定^[6].自 1942 年 Archie^[7] 提出了适用于饱和和无黏性土的电阻率模型之后, Keller 等^[8]、Waxman 等^[9] 进一步进行了完善,查甫生等^[10] 在此基础上借鉴 Mitchell 的三元导电模型建立了适用性更广的非饱和黏土电阻率模型.相关学者在电阻率的影响因素及工程应用上也进行了大量相关研究,在重金属污染土^[11]、盐渍土^[12] 及油类污染土^[13] 的研究取得了一些成果.刘松玉等^[14-15] 对重金属污染土的电学特性进行了试验和理论论证;刘国华等^[16] 对土体电阻率与工程力学指标间的关系进行了研究;Sudha 等^[17] 将电阻率法与工程性状勘察方法联合起来进行工程应用;Chu Y 等^[18-20] 将电学指标应用于膨胀土及污染土的评价中.有关西北地区黄土受酸碱溶液侵蚀后电阻率的演变规律特征以及评价酸碱污染工程场地的关键指标间的协同关系尚未见报道,因此,对于酸碱污染黄土地区的电学特征亟待开展相关研究.

基于此,本文在原有电阻率模型的基础上通过室内试验研究,揭示了含水率、酸碱两种污染类型及其不同浓度、压实度等与电阻率间的关联关系,分别得到了电阻率与含水率、污染浓度及压实度的经验公式.以为酸碱废液污染黄土场地的工程评价、污染程度划分和环境防治提供有益的参考.

1 试验研究

为了进一步研究酸碱污染土的电阻率特性,本文对铜川 Q₃ 黄土进行重塑污染后进行了相关试验研究,主要探讨含水率、污染浓度、压实度对污染土电阻率的影响特征.

1.1 试验材料

本文中的试验所用 Q₃ 黄土土样取自陕西省铜川耀州区(如图 1(a)、(b)),土质较为均匀.取样部位地表土层分布为新近堆积的 Q₄ 黄土层,取样深度为 2.0~3.0 m,如图 1(c)所示.对土样进行试验,测得土样的物理力学指标见表 1,土样的颗粒分曲线如图 1(d)所示.

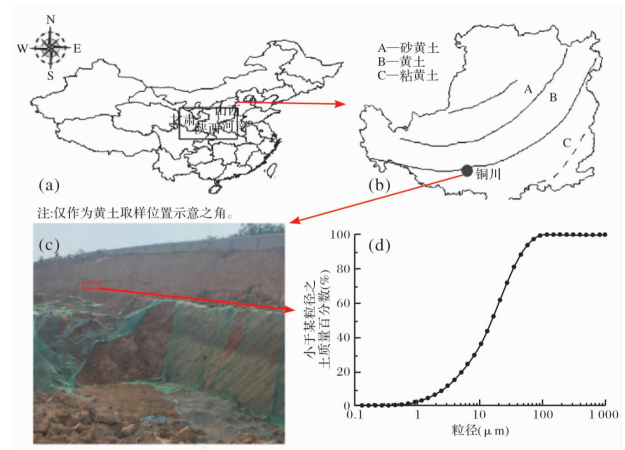


图 1 取样地点及粒径分析

Fig. 1 Sampling location and particle size analysis

表 1 试验土样的物理指标

Tab. 1 Physical index of the test loess sample

比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	最优含水率 $w/\%$
2.72	35.43	21.42	16.8
最大干密度 $\rho_{dmax}/g/cm^3$		塑性指数 $I_p/\%$	
1.38		14.01	

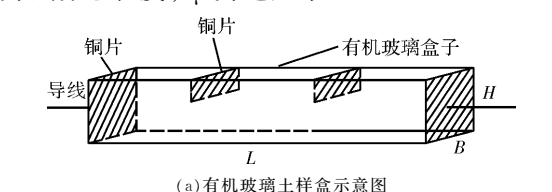
1.2 试验装置

土体室内电阻率测试技术通常采用“二相电极法”和“四相电极法”^[21-23].为减小潜在电泳、极化以及污染物运移等有关现象对试验的影响,本次试验采用 Miller Soil Box 测试污染土样的电阻率装置^[24].如图 2 所示.长方体有机玻璃土样盒内径尺寸为 $L \times B \times H = 22.2 \text{ cm} \times 3.2 \text{ cm} \times 4.0 \text{ cm}$,两端分别放置与长方体截面大小一致的纯铜电极片作为电流测试电极,中部每 1/3 等分点处插入铜片作为电压测试电极.试样制作完成后,按照图 2(b)所示的电阻率测试基本电路图连接成闭合回路.电源采用交流供电转换为 0.1~30.0 V 的直流(DC)电压, A、V 分别表示高精度电流表和电压表; R_x 为待测击实试样.试样的电阻率计算公式为

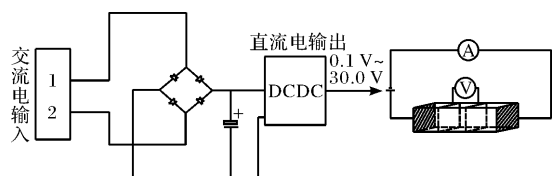
$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{3BH}{L} \quad (1)$$

其中: U 为实测电压读数; I 为实测电流读数; R_x

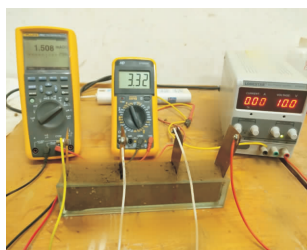
为土的电阻; BH 为试样截面面积, 等于 $B \times H$; L 为试样总长度; ρ 为电阻率。



(a) 有机玻璃土样盒示意图



(b) 电路连接示意图



(c) 测试装置实物图

图2 污染原状土样电阻率测试装置及基本电路图

Fig. 2 The basic circuit diagram

1.3 试验内容及具体步骤

为了模拟酸碱污染黄土的电学特性影响, 在室内测试不同含水率、压实度、污染浓度及污染物种类下试样的电阻率, 进一步对电阻率与基本物理参数间的关联性进行分析。基于前人研究及实际工程配制四种浓度(0.1 mol/L、0.5 mol/L、1.0 mol/L、2.0 mol/L)的 H_2SO_4 及 NaOH 溶液作为污染物, 按照《土工试验方法标准》^[25] (GB/T 50123-1999) 分别与风干土样进行拌和配置含水率为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 的污染土样, 在保鲜袋中密封保存 24 h 后进行压实, 进行不同压实条件下(0.80、0.85、0.90、0.93、0.95)的电阻率测试。其中 H_2SO_4 溶液污染试样 $6 \times 5 \times 4 = 120$ 个, NaOH 溶液污染试样 120 个, 增湿试样 30 个; 考虑设置一组平行试样, 共计 540 个试样。

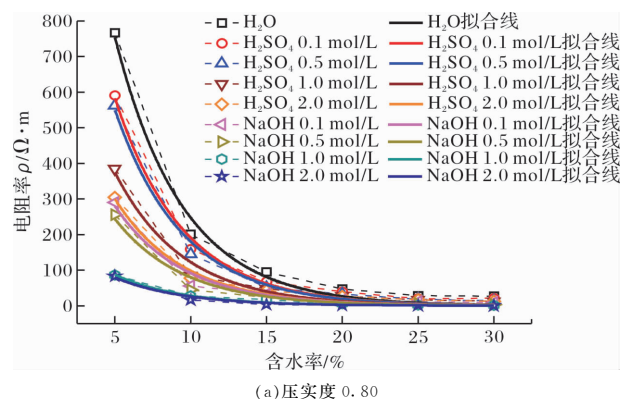
每种试验条件下的具体操作步骤如下: 已知 Miller Soil Box 的体积可换算出满足压实度要求的所需试样的干土质量及所需污染液用量, 待含水率分布较为均匀时, 分层装入 Miller Soil Box, 并将其接入测量电路进行试验, 根据式(1)计算土样电阻率; 清洗 Miller Soil Box 及其他试验装置, 制备下一组试样。考虑试验过程中可能中间一组几乎无极化现象出现, 而两端极化现象明显, 在每一种浓度测试结

束后即对两端铜片电极进行及时更换。

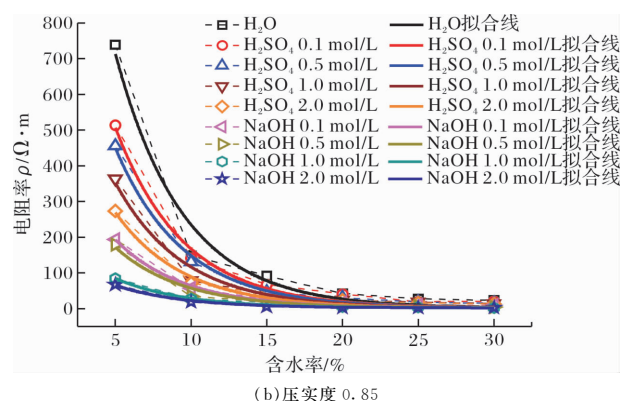
2 结果分析

2.1 含水率的影响

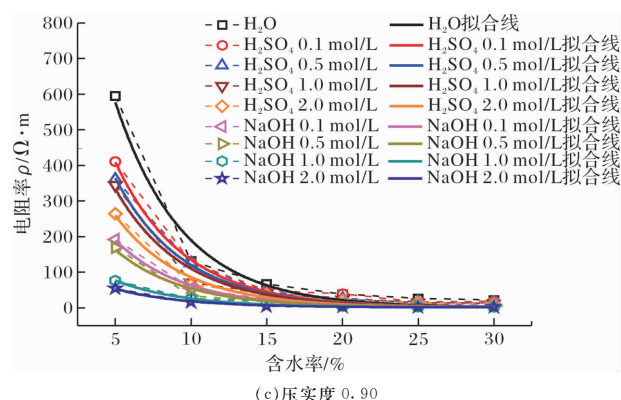
考虑到孔隙溶液的导电能力远优于其他两相, 因此含水率是影响土体电阻率特性的重要影响因素。图3为不同压实度下电阻率随含水率的变化关系。由图可见, 在压实度保持不变时, 同种污染状态下土体电阻率随含水率的增加呈现衰减趋势, 且在低含水率下减小速率较快, 随着含水率的增加至某一阈值时, 衰减速率明显降低。函数率较低时, 含水率的增大改变了土体的三相组成结构, 气相逐渐减少, 孔隙水连通性逐渐增强, 土颗粒间的接触达到最佳状态; 当含水率增加至某个阈值时, 孔隙水的连通性变化较小, 因而衰减速率明显降低。



(a) 压实度 0.80



(b) 压实度 0.85



(c) 压实度 0.90

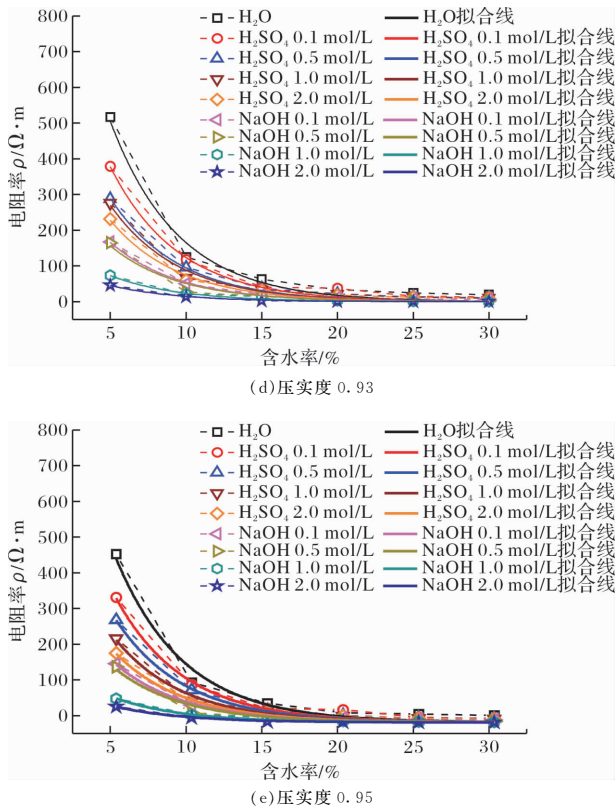


图3 不同压实度下电阻率随含水率的变化关系

Fig. 3 Variation of resistivity with water content under different degrees of compaction

拟合含水率与电阻率之间的关系如式(2)所示,

$$\rho = a \times 0.8^{\omega} \quad (2)$$

式中: a 为试验参数; ω 为含水率。

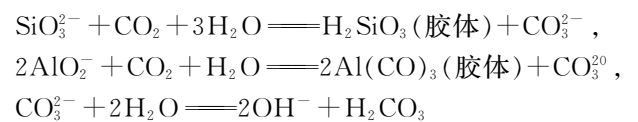
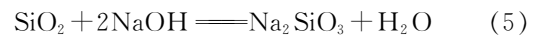
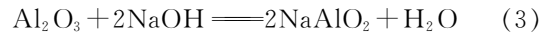
从图3中可以看出,未污染状态与不同浓度酸碱污染状态的试样电阻率均随着含水率的增加呈现减小趋势,且在15%~30%范围内变化速率减缓,存在一个临界阈值,表征着该种状态下含水率对电阻率的影响程度。

2.2 污染溶液浓度的影响

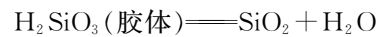
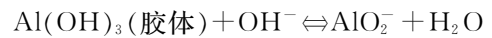
结合图3可以得出,同种浓度下硫酸污染土的电阻率大于氢氧化钠污染土的电阻率值,孔隙溶液的电阻率与阳离子物态参数相关,且在低含水率下特征明显。两种污染土的电阻率值均随着污染浓度的增加逐渐降低,且在含水率较低时降低明显,较高含水率弱化了这种影响,如前所述,存在含水率的临界阈值。

分析其原因在于^[26-30],黄土中的化学成分复杂,存在有较多的氧化物等次生矿物,当被硫酸污染后,发生化学反应的几率会大大增加,同时也使得土体中离子增多,进一步增大了孔隙溶液的连通性,增强了土颗粒孔隙与土颗粒表面的电化学性能。而NaOH污染土的电阻率变化规律与H₂SO₄呈现出的规律相同,但其生成物成分不同。碱液侵入黄土发生侵蚀—胶结—溶解等一系列反应,其中,初期发生式(3)~(6)所示的侵蚀,水解电离出的OH⁻与SiO₂、Al₂O₃反应生成SiO₃²⁻

和AlO₂⁻,消耗了土颗粒中的胶结氧化物,生成H₂O。进一步发生胶结反应,如式(7)~(8)所示,在此过程中生成絮状沉淀,同时生成了OH⁻,增加了孔隙液中的离子数目。随着碱液进一步增加以及OH⁻的产生,新生胶体稳定性较差,极易溶于水,又产生可溶盐,生成水,增加了孔隙液的连通性和导电性。随着碱液浓度升高,化学反应不断反复进行,离子数目、离子所带电荷总数不断增加,电场驱动下导电性增强,电阻率越低。



(7)



2.3 压实度的影响

在含水率不变的情况下,选取不同压实度试样的电阻率进行分析(结合上述分析,以低含水率5%和较高含水率25%为例),如图4所示。总体来看,不同污染状态土体的电阻率随压实度增加逐渐减小,随着污染浓度的增加,电阻率的减小速率降低。

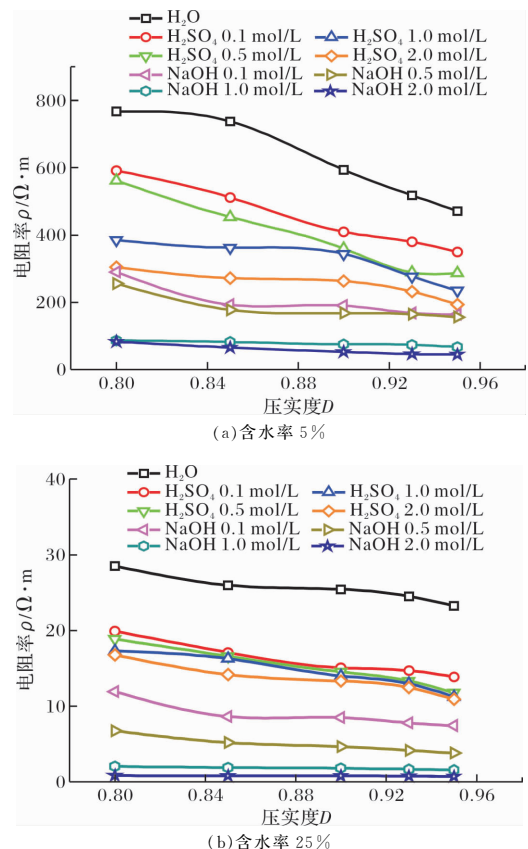


图4 电阻率随压实度的变化关系

Fig. 4 Variation of resistivity with degree of compaction

2.4 试验参数间的协同关系

定义硫酸污染土按式(2)拟合时的试验系数为 a_1 , 氢氧化钠污染土的待定系数为 a_2 . 将 a_1 、 a_2 分别与污染浓度进行关联预测分析, 如图5所示.

$$a_1 = A_1 + B_1 \times \exp(-2C) \quad (9)$$

$$a_2 = A_2 - B_2 \times \ln(C) \quad (10)$$

式中, c 为污染浓度, A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 为待定系数.

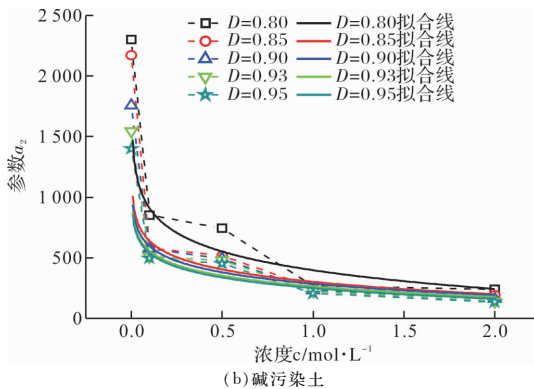
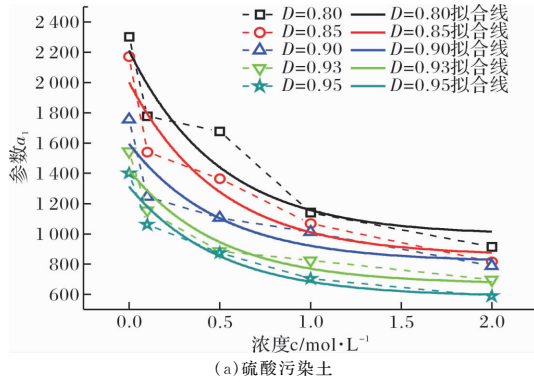


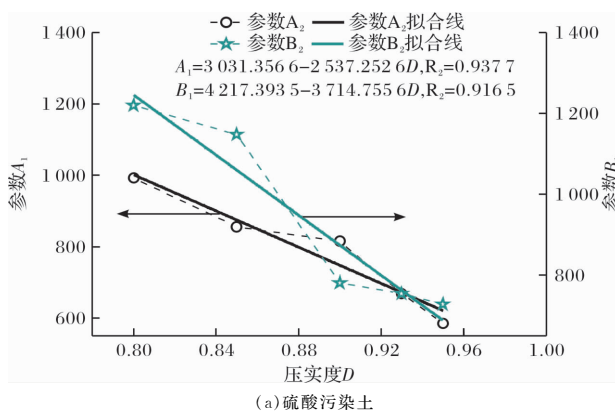
图5 污染土电阻率预测参数与浓度关系

Fig. 5 Relationship between the predicted parameters of resistivity of contaminated soil and concentration

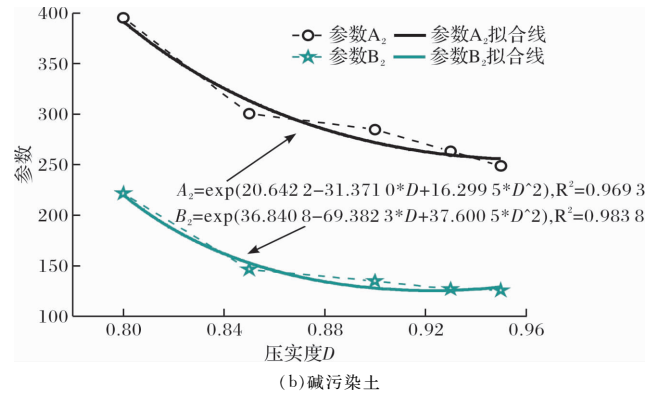
选取据图5中拟合的待定系数, 与压实度进行关联分析如图6所示. 并得到 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 与压实度 D 的关系公式, 再进一步代入式(2)有:

$$\rho_1 = \left(\frac{(4217 - 3714D) \times \exp(-2c)}{-2537 \times D + 3031} \right) \times 0.80^w \quad (11)$$

$$\rho_2 = \left(\frac{-\exp(36.8 - 69.4D + 37.6 \times D^2)}{\times \ln(c) + \exp(20.6 - 31.4D + 16.3 \times D^2)} \right) \times 0.80^w \quad (12)$$



(a) 硫酸污染土



(b) 碱污染土

图6 污染土电阻率预测参数与压实度关系

Fig. 6 Relationship between the predicted parameters of re-sistivity of contaminated soil and compaction degree

式中各项字母同前, ρ_1 为硫酸污染土电阻率, ρ_2 为碱污染土电阻率.

3 结论

本文对比分析了不同浓度的 H_2SO_4 、 $NaOH$ 污染黄土的电阻率特征及其与含水率、污染浓度、压实度等指标间的关系, 建立了物理参数和电学参数间的演变联系, 初步提出了酸碱污染黄土的电阻率与物理指标间的关系;

(1)通过室内试验, 酸碱污染黄土的电阻率随含水率的增加呈幂函数关系降低的规律. 同种污染浓度下, 酸污染土的电阻率大于碱污染土的电阻率; 酸碱污染土的电阻率随着污染浓度及压实度的增加均呈现减小趋势;

(2)在低含水率下, 污染土电阻率随压实度及浓度的变化趋势显著; 在含水率较高时, 污染土电阻率随压实度及浓度的变化趋势较弱;

(3)考虑多种因素的协同作用, 初步提出了考虑含水率、压实度、污染浓度等因素作用下的酸碱污染土电阻率关系公式.

参考文献 References

- [1] 李宁,程国栋,谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报,2001,23(3):268-272.
LI Ning, CHENG Guodong, XIE Dingyi. Geomechanics development in civil construction in Western China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268-272.
- [2] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007(7):6-21.
XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7):

- 1297-1312.
- [3] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980(20): 35-38.
GAO Guorui. Microstructure of Chinese loess [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(20): 35-38.
- [4] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 287-293.
XU Ling, DAI Fuchu, KUANG Guolin, et al. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 287-293.
- [5] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 1-37.
LIU Songyu. Geotechnical investigation and remediation for industrial contaminated sites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 1-37.
- [6] 宋杰, 李术才, 刘斌, 等. 基于电阻率特性的非饱和土压实度定量评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(6): 33-41.
SONG Jie, LI Shucai, LIU Bin, et al. Quantitative assessment method of unsaturated soil compaction degree based on resistivity property [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(6): 33-41.
- [7] ARCHIE G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transaction of American Institute of Mining Metallurgical Engineers, 1942, 146(2): 54-62.
- [8] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamum Press, 1966.
- [9] MITCHELL J K, ARULANANDAN K. Electrical dispersion in relation to soil structure [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(2): 447-472.
- [10] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1671-1676.
ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayed soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1671-1676.
- [11] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 锌污染土物理与电学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015(10): 131-137.
CHU Ya, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Experimental study on physical and electrical characteristics of zinc-contaminated soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(10): 131-137.
- [12] 姚远, 吴元莉, 孙博. 高密度电阻率法对盐渍土的检测效果分析[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 115-118.
YAO Yuan, WU Yuanli, SUN Bo. High-density electrical detection effect of saline soil [J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(5): 115-118.
- [13] 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 Songyu, BIAN Hanliang, CAI Guojun, 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.
- [14] CAI G, CHU Y, LIU S, et al. Evaluation of subsurface spatial variability in site characterization based on RCPTU data [J]. Bulletin of Engineering Geology and the environment, 2015, 75(1): 1-12.
- [15] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 重金属污染黏性土电阻率影响因素分析及其预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 866-871.
CHU Ya, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Impact factor analysis of resistivity of heavy metal polluted cohesive soil and its prediction model [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4): 866-871.
- [16] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87.
LIU Guohua, WANG Zhenyu, HUANG Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83-87.
- [17] SUDHA K, ISRAIL M, MITTAL S, et al. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(1): 74-79.
- [18] CHU Y, LIU S, BATE B, et al. Evaluation on expansive performance of the expansive soil using electrical responses [J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 148: 265-271.
- [19] CHU Y, LIU S, WANG F, et al. Electric conductance response on engineering properties of heavy metal polluted soils [J]. Journal of environmental chemical Engineering, 2018, 6(4): 5552-5560.
- [20] CHU Y, LIU S, WANG F, et al. Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(15): 13561-13575.
- [21] 付伟. 单轴压缩与冻融作用下粉质粘土电阻率特性试验研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2009.
FU Wei. Experimental study on electrical resistivity

- char-acteristics of silty clay under uniaxial compression and frozen-thaw cycles [D]. Wuhan: Chinese academy of sci-ences, 2009.
- [22] JI Weiyu, NERETNIEKS Ivars. Modeling of transport and reaction processes in a porous medium in an electrical field [J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51 (19): 4355- 4368.
- [23] ZEYAD S Abu-Hassanein. Electrical resistivity of compacted clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 122(5): 397-406.
- [24] SPAGNOLI G, SRIDHARAN A, Oreste P, et al. 2017. A probabilistic approach for the assessment of the influence of the dielectric constant of pore fluids on the liquid limit of smectite and kaolinite [J]. Appl. Clay Sci. 145, 37-43.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [26] 刘华, 胡文乐, 牛泽林, 等. 重塑污染 Q3 黄土的电阻率特征演变试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(10): 64-73.
- LIU Hua, HU Wenle, NIU Zelin, et al. Experimental study on evolution of resistivity characteristics of re-modeled polluted Q3 loess [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (10): 64-73.
- [27] RHOADES J D, MANTEGHI N A, SHOUSE P J et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formula-tion and calibrations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 433-439.
- [28] JACKSON P. An electrical-resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands [J]. Marine Geotechnical, 1975, 1(2): 91-115.
- [29] RHODES J, RAATS P, PRATHER R. Effect of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40: 651-655.
- [30] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1993.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 336 页)

- [13] 刘红军, 李正良, 李茂华. 钢管输电塔环型加肋节点极限承载力研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 65-73.
- LIU Hongjun, LI Zhengliang, LI Maohua. Study of ultimate strength of steel tubular joint with annular ribbed plate of transmission towers[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 65-73.
- [14] 刘红军, 李正良. 基于钢管控制的插板连接节点受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 21-27.
- LIU Hongjun, LI Zhengliang. Bending performance of tube-gusset joint in steel tubular tower based on steel tube control[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 21-27.
- [15] 陈誉, 黄勇, 冯然. X形圆管斜插板节点轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 90-97.
- CHEN Yu, HUANG Yong, FENG Ran. Experimental study on compressive property of circular tube-skewed gusset X-joints[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 90-97.
- [16] 高春彦, 史治宇, 牛丽华, 等. 圆钢管混凝土 K 型焊接管板节点试验研究和有限元分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(3): 769-778.
- GAO Chunyan, SHI Zhiyu, NIU Lihua, et al. Experimental study and finite element analysis of concrete-filled circular steel tubular K-type welded tube-gusset joints[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(3): 769-778.
- [17] QU S, WU X, SUN Q. Experimental study and theoretical analysis on the ultimate strength of high-strength-steel tubular K-Joints[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123: 244-254.
- [18] SUN Q, QU S, WU X. Ultimate load capacity analysis of Q690 high-strength steel KK-Type tube-gusset plate connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(8): 1-15.

(编辑 吴海西 沈 波)