

MTBE 污染黏土电阻率特性试验研究

祁妍敏, 章定文*, 林文丽

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189)

摘要: 对污染场地进行地基处理前需进行污染评价, 电阻率法是常用的监测方法。为研究非水相液体污染黏土的电阻率特性, 本文应用二极法对水饱和、污染物与水共同饱和、非饱和状态下的污染土电阻率进行了测试。试验结果显示, 水饱和和黏土的地层因子随孔隙率的增大而增大; 饱和和污染黏土的电阻率随着水饱和度的增大呈幂函数形式降低; 非饱和状态下, 当体积含污率一定时, 土体电阻率随着体积含水率的增大呈幂函数关系减小, 体积含水率一定时, 土体电阻率随着体积含污率的增大而线性增大, 体积含湿率的增加会使土体电阻率逐渐减小。正交试验结果表明, 本试验中影响污染土电阻率的因素主次顺序为: 体积含水率、孔隙率、体积含污率。

关键词: 非水相污染物; 污染土; 二极法; 电阻率特性; 影响因素; 正交分析

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0029-08

Experimental study on resistivity characteristics of MTBE contaminated clay

QI Yan-min, ZHANG Ding-wen*, LIN Wen-li

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: Contamination evaluation is required before foundation treatment of contaminated sites, and resistivity method is a common monitoring method. In order to study the resistivity characteristics of non-aqueous phase liquid contaminated clay, this paper applied the two-electrode method to test the resistivity of contaminated clay in water-saturated, contaminant-water co-saturated and unsaturated states. The test results show that, the formation factor of water-saturated clay increases with the increase of porosity; and the resistivity of saturated contaminated clay decreases as a power function with the increase of water saturation. In unsaturated state, the soil resistivity decreases as a power function with the increase of volumetric water content for a given volumetric dirt content. The soil resistivity increases linearly with the increase of volumetric dirt content for a given volumetric water content, and the increase of volumetric moisture content will cause the soil resistivity to decrease gradually. The results of orthogonal experiments show that the factors affecting the resistivity of contaminated soil in this test are in the following order: volumetric water content, porosity, volumetric dirt content.

Key words: non-aqueous phase pollutants; contaminated soils; two-electrode method; electrical resistivity characteristic; influence factors; orthogonal analysis

0 引言

污染场地的勘察与评价是场地修复和加固措施选择的依据。近年来, 电阻率法在污染场地的勘察与评价中体现了明显的优势, 成为应用最为广泛的地球物理监测方法之一^[1-3]。

电阻率是土体的固有参数之一, 可用于表征

土体特性的变化。土体电阻率会受到土体种类、孔隙率、饱和度、含水率、孔隙液成分等多种因素的影响^[4-5]。广大学者和工程师对电阻率法在岩土工程中的应用开展了大量探索与实践。自 1942 年 ARCHIE^[6] 率先提出饱和和无黏性土的电阻率与土体孔隙率的数学关系以来, 众多学者对土体的电阻率特性进行了更为深入的研究, 试图将土体

收稿日期: 2022-03-17

作者简介: 祁妍敏 (1997—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: 220203217@seu.edu.cn。

*通信作者: 章定文 (1978—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理方面的工作。E-mail: zhang@seu.edu.cn。

的电阻率与各个影响因素关联起来,代表性的如 KELLER 等^[7]考虑了饱和度对土体电阻率的影响; WAXMAN 等^[7]考虑了黏土颗粒双电层对土体电阻率的影响; MITCHELL^[9]考虑了电流导通路径,并提出了土体的三元导电模型等。

在非水相液体污染场地中,非水相污染物的存在会改变孔隙液体的分布状态,影响黏土颗粒表面的双电层,从而使其电阻率发生改变^[4]。刘汉乐等^[10]、边汉亮等^[11]、潘玉英^[12]等通过室内单元试验研究了污染土的电阻率特性,室内试验结果均表明,电阻率也可用来评价土体的污染程度。

目前学者们多以砂土、粉质黏土为研究对象来研究非水相液体污染土的电阻率特性,但根据我国工业污染场地分布位置与沿海、沿江低渗透地层相重合的背景而言,还需要加强对污染黏土的电阻率特性研究,为电阻率法在工业污染场地中的应用提供基础。

本文将以上海黏土为研究对象,选用甲基叔丁基醚(MTBE)作为非水相污染物,通过室内单元试验,研究不同饱和度、体积含水率、体积含污率、体积含湿率对土体电阻率的影响规律,并通过正交试验对各影响因素的主次顺序进行分析,研究成果可为非水相污染物污染土体的电阻率评价模型的建立提供依据。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验用土取自上海市奉贤区某专用试验场地,其基本物理指标如表1所示,该土分类为低液限黏土。试验采用的非水相污染物为甲基叔丁基醚(简称MTBE),其密度为 0.65 g/cm^3 ,属于轻质非水相液体(LNAPL)。

1.2 试验装置

为减少对试样的扰动,试验采用二极法测量试样电阻率,即通过在试样两端布置电极片,采用电阻率测试仪器测得整个试样的电阻值,再根据试样尺寸计算电阻率。电阻率测试仪器为GWINSTEK公司生产的LCR-817型电阻率测试

仪,如图1所示。测试装置为采用有机玻璃自制的米勒土盒(Miller Soil Box),其内部尺寸为 $12 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$,两端设置铜电极片为电流测量电极,铜片面积与试样截面相同。电阻率测量原理如图2所示,电阻率按式(1)计算。

$$\rho = RA / L \quad (1)$$

式中: R 为整个试样的电阻; A 为试样的横截面面积; L 为试样长度。

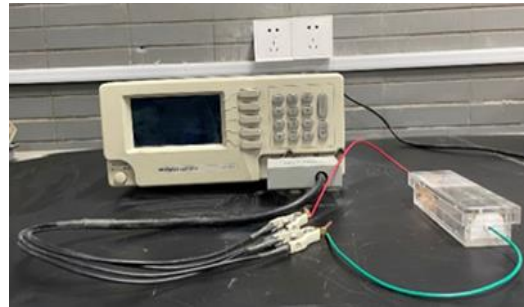


图1 二极法测量电路

Fig. 1 Circuit measurement by two-electrode method

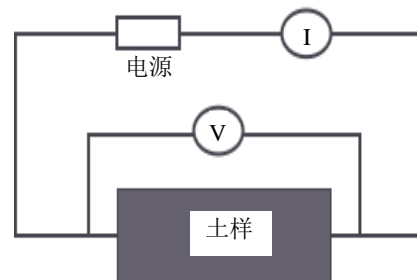


图2 电阻率测量原理

Fig. 2 Principle of resistivity measurement

1.3 试验方法

试验内容包括3部分:研究环境因素对电阻率的影响,包括测试频率和测量时间;研究水饱和土、饱和污染土、非饱和污染土3种状态的电阻率变化规律;通过正交试验研究体积含水率、体积含污率、孔隙率对电阻率影响的主次顺序。

试验变量的梯度设计:土体干密度分别按 1.4 g/cm^3 、 1.5 g/cm^3 、 1.6 g/cm^3 变化;控制土体饱和度一定时,孔隙中水和污染物的体积比例分别按0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、5.0、10变化;控制变量时,体积含水率和体积含污率分别按0.0、0.1、0.2、0.3、0.4变化。

表1 土体物理参数

Table 1 Physical parameters of soil

指标	天然密度/ (g/cm^3)	比重	天然含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	最优含水率/ %	最大干密度/ (g/cm^3)
数值	1.97	2.71	24.6	46.9	21.8	25.1	10.2	1.92

具体试验步骤为先将试验用土风干粉碎后过 2 mm 筛, 再根据设计的变量梯度称取相应质量的蒸馏水, 加入土样中拌制均匀, 用保鲜膜密封后静置 24 h; 依据设计的变量梯度称取相应质量的 MTBE 污染物, 加入试样中拌制均匀, 密封后放入标准养护室养护 7 d, 以确保污染物分布均衡。每个配比的试样均进行 3 组平行试验。

2 环境因素对电阻率的影响分析

2.1 测试频率对土体电阻率的影响

采用交流电测量土体的电阻率可以避免采用直流电测量时引起的电动现象、电化效应等, 但其测量频率会影响土体的电阻率测试结果。SHAH 和 SINGH^[14] 通过试验提出了黏性土的电导率与交流电测试频率之间的关系, 如图 3 所示。该结果表明, 在低频条件下土体会产生电极极化现象, 此时离子会在电极附近积聚形成一层导电性较差的薄膜而使土体的导电性变差, 随着测试频率的增加, 电导率逐渐增大。当测试频率处于中间某一范围时, 土体电导率基本保持稳定, 此时电流的传导符合欧姆定律。在高频条件下黏土颗粒表面双电层中的离子将被释放出来, 从而能提高土体的导电性, 即发生双电层的松弛效应^[15]。

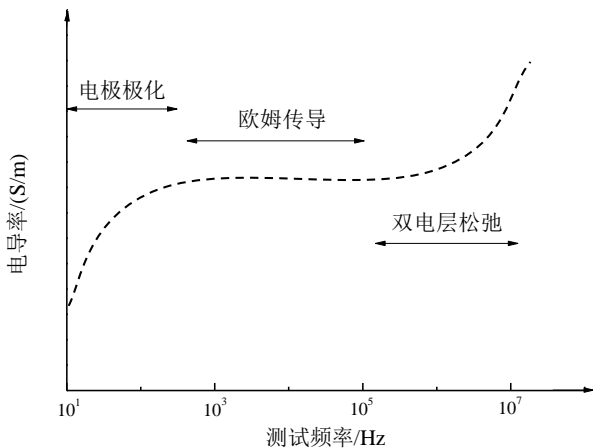


图 3 黏性土电导率随电流频率变化的典型规律^[14]

Fig. 3 Typical law of conductivity of cohesive soil varying with current frequency^[14]

50~100 kHz 的频率范围内, 试样电导率随测试频率的变化曲线如图 4 所示。结果显示, 测试频率介于 1~50 kHz 时, 试样电导率随频率的增加而迅速增大; 测试频率介于 1~100 kHz 时, 试样电导率的生长速率减缓, 该试验结果与 SHAH 和 SINGH^[14] 的研究结果一致。由数据分析可知, 在符合欧姆传导定律的频率范围内 (1~100 kHz),

试样电阻率变化幅度均不超过 10%, 表明该范围内土体电阻率测量结果相差不大。因此本试验选取的测试频率为 10 kHz, 尽可能避免电极极化和双电层松弛效应。

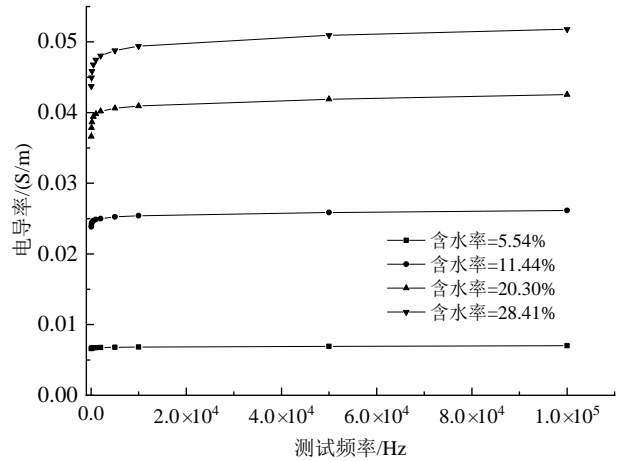


图 4 土体电导率与测试频率的关系

Fig. 4 Relationship between soil resistivity and test frequency

2.2 时间对土体电阻率的影响

因水和 MTBE 污染物的密度不同, 以质量比定义参数不能客观反映其含量的多少, 所以引入体积含水率和体积含污率两个参数, 分别定义为水、污染物的体积与土颗粒的体积之比, 如式 (2)、式 (3) 所示。

$$R_w = V_w / V_s \quad (2)$$

式中: V_w 为水的体积; V_s 为土颗粒的体积。

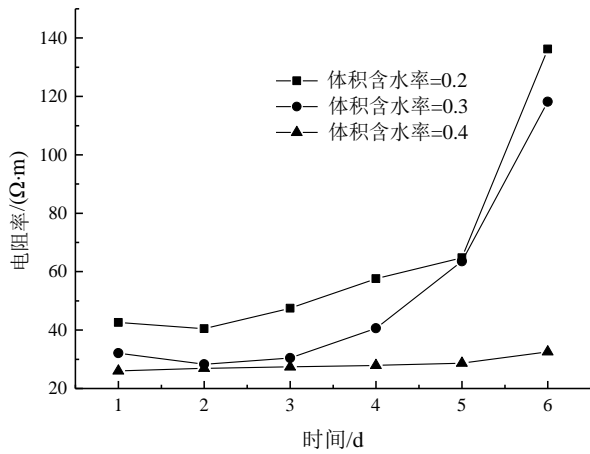
$$R_o = V_o / V_s \quad (3)$$

式中: V_o 为污染物的体积; V_s 为土颗粒的体积。

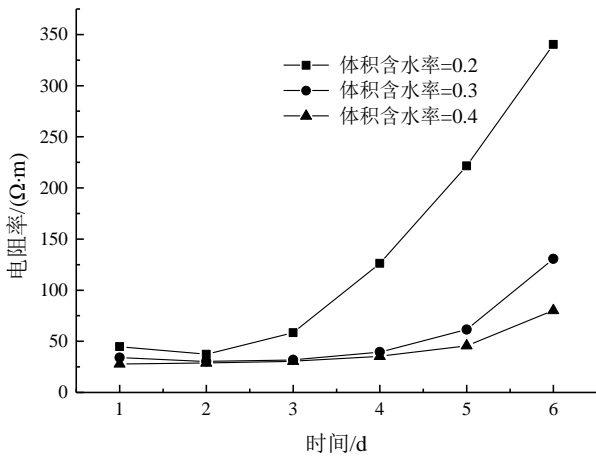
单元试样制备完成后, 测得试样电阻率随时间的变化结果如图 5 (a)、(b) 所示。试验结果显示: 当体积含污率一定时, 随着体积含水率的增大, 电阻率随时间的变化幅度越来越小; 对同一试样, 电阻率随时间的推移而逐渐增加, 且速率越来越快。

产生该现象的原因在于试样孔隙中的液体存在挥发现象, 纯水及纯 MTBE 污染物的挥发速率较快, 当二者与土体混合时, 挥发速率受到土颗粒及 MTBE 污染物或水的影响而减弱, 当挥发的孔隙液体累积到一定程度时便会引起试样电阻率的显著变化。含水率是影响土体电阻率的重要因素^[16-17], 水分的损失会使土体孔隙的连通性逐渐减弱, 从而使试样电阻率逐渐增大; 另一方面, 根据电阻率与水饱和度的幂函数关系曲线可知, 水饱和度越低, 电阻率的变化幅度越大。

由试验结果可知,对环境因素的控制是提高数据准确性的重要途径,所以在试样制备完成后需要尽快进行电阻率测量,尽可能减小电阻率随时间间隔而产生的误差。



(a) 体积含污率为 0.3 时电阻率随时间的变化



(b) 体积含污率为 0.4 时电阻率随时间的变化

图 5 土体电阻率随时间的变化规律

Fig. 5 Variation of soil resistivity with time

3 试验结果与分析

3.1 水饱和和土电阻率特性

ARCHIE^[6] 基于饱和纯净砂岩试样的电阻率试验,提出了 Archie 电阻率模型,即:

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (4)$$

式中: a 为试验参数; ρ_w 为孔隙水电阻率; n 为土体孔隙率; m 为胶结指数。

ARCHIE 将式(4)中土体电阻率与孔隙水电阻率之比定义为地层因子 F , 并认为地层因子可反映土体的结构特性和孔隙状况^[13]。与砂土的规律相反^[18], 试验中测得黏土的孔隙率 n 与地层因子 F 在双对数坐标系下呈正相关线性关系, 试验结果如图

6 所示。推测其原因为: 对于黏性土, 土颗粒表面电荷的存在会降低土体的电阻率, 因此孔隙率较小时土颗粒所带电荷总数较多, 所以相对于孔隙率较大的情况电阻率会有所降低。

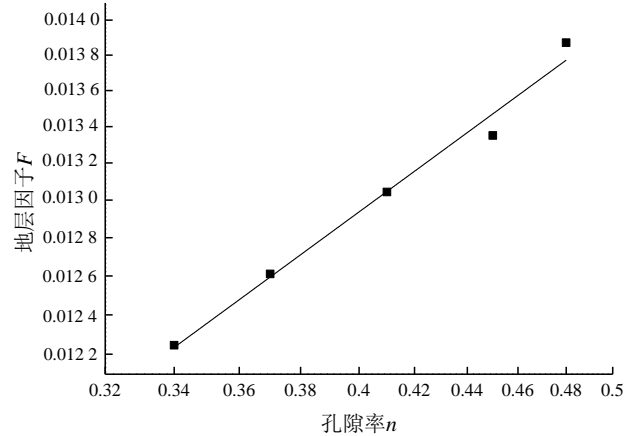


图 6 孔隙率与地层因子的关系

Fig. 6 Relationship between porosity and formation factor

3.2 饱和污染土电阻率特性

当土体孔隙中由水饱和和填充过渡为 MTBE 污染物与水共同填充时, 污染物的存在会对黏土颗粒的双电层产生影响, 进而影响土体的电阻率^[11]。为表征水与 MTBE 饱和度程度, 本文定义水饱和度 S_w 为土体中水的体积与孔隙体积之比, 定义污染物饱和度 S_o 为土体中污染物的体积与孔隙体积之比。

由试验得到的饱和土电阻率与水饱和度之间的关系如图 7 所示。结果显示, 同一干密度条件下, 试样电阻率随水饱和度的增加而呈幂函数形式降低, 当水饱和度高于 60% 后, 电阻率变化幅度很小; 试样电阻率受干密度的影响随孔隙中含水饱和度的升高逐渐降低。

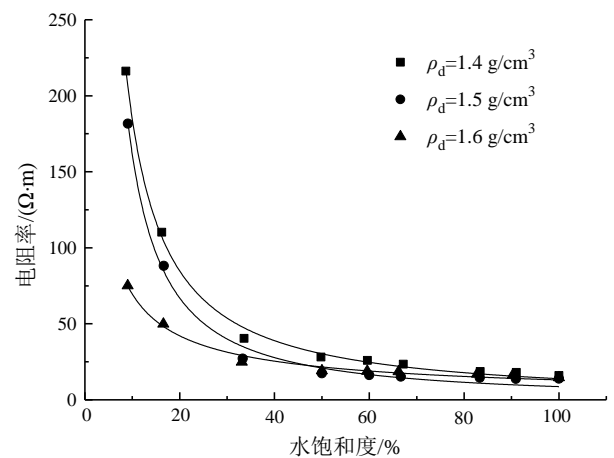


图 7 饱和污染土电阻率与水饱和度的关系

Fig. 7 Relationship between resistivity and water saturation in saturated contaminated soil

土体电阻率随水饱和度呈幂函数降低的规律符合推广的 ARCHIE 公式形式, 即

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_w^{-p} \quad (5)$$

式中: a 为试验参数; ρ_w 为孔隙水电阻率; n 为土体孔隙率; m 为胶结指数; S_w 为水饱和度; p 为饱和度指数。

土体电阻率主要由孔隙水的连通性控制, 在水饱和度较低时, 孔隙连通性不良, 所以电阻率较高; 后期随着水饱和度的增加, 孔隙连通性逐渐得到改善, 所以电阻率下降较快; 当土体接近饱和时, 水饱和度的增加对土体孔隙连通性的影响减弱, 所以电阻率变化的幅度也逐渐减小^[19]。

由于污染物 MTBE 相对于孔隙水为高阻物质, 在孔隙中填充的效果相当于缩小了孔隙的体积, 此时孔隙水所填充的孔隙比为:

$$e_w = e(1 - S_o) \quad (6)$$

式中: e 为土体孔隙比; S_o 为污染物饱和度。

由孔隙比与孔隙率的换算关系可知, 孔隙水填充的孔隙率为:

$$n_w = \frac{e_w}{1 + e_w} \quad (7)$$

将式 (5)、式 (6) 代入式 (4) 中, 得

$$\rho = a\rho_w \left(\frac{e(1 - S_o)}{1 + e(1 - S_o)} \right)^{-m} S_w^{-p} \quad (8)$$

式 (8) 便为饱和污染土电阻率随孔隙中水、污染物饱和度变化的关系模型。

由试验结果可知, 土体电阻率随干密度的增加而逐渐减小, 分析其原因, YOON 等^[20] 认为含水率相同时, 土体孔隙率越小 (或土体干密度增大), 孔隙水及土颗粒的连通性越高, 使得电流路径增加, 从而减小了电阻; 因本试验用土为黏土, 也可能一部分原因是随着试样干密度的增加, 单位体积内的土颗粒数量增多, 因此土颗粒表面所带的电荷总数增多, 导致土体的电阻率有所下降。

3.3 非饱和和污染土电阻率特性

(1) 体积含水率对土体电阻率的影响

非饱和状态下, 污染土的电阻率随体积含水率的变化规律如图 8 所示。结果表明, 在同一干密度条件下 (试验中控制干密度为 1.5 g/cm^3), 当体积含污率一定时, 土体电阻率随着体积含水率的增大也呈幂函数形式降低, 其变化机理与孔隙的连通性有关。

(2) 体积含污率对土体电阻率的影响

土体电阻率与体积含污率的关系如图 9 所示。结果表明, 当体积含水率一定时, 土体电阻率随着体积含污率的增大而增大, 这是由于 MTBE 为高阻物质, 其含量的增大使孔隙液电阻率增大, 从而使土体电阻率增加。通过数据拟合发现电阻率随体积含污率呈线性规律变化, 与边汉亮等^[10]、SON 等^[21] 学者的研究结果一致。

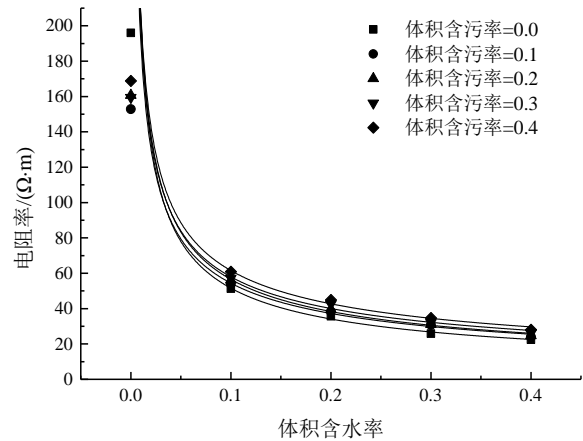


图 8 污染土电阻率与体积含水率的关系

Fig. 8 Relationship between resistivity and volumetric water content of contaminated soil

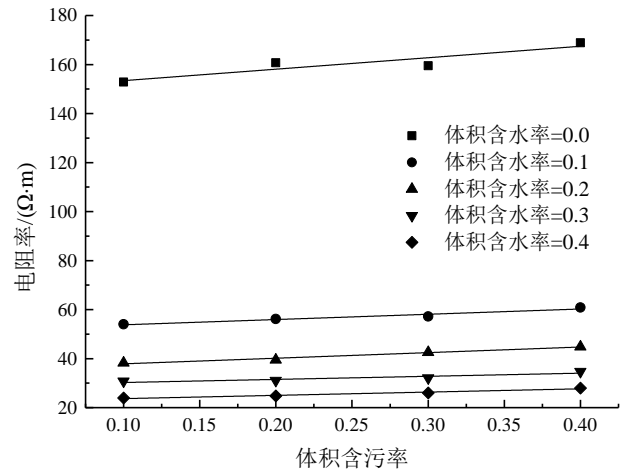


图 9 污染土电阻率与体积含污率的关系

Fig. 9 Relationship between resistivity of contaminated soil and volumetric dirt content

(3) 体积含湿率对土体电阻率的影响

定义体积含湿率为孔隙中水与污染物的体积之和与土体体积之比^[4], 定义水污比为孔隙中水的体积与污染物的体积之比。体积含湿率一定时, 土体电阻率随水污比的变化规律如图 10 所示。结果表明, 土体电阻率随水污比的增大呈幂函数形式降低; 水污比一定时, 随着体积含湿率的增大, 土体电阻率逐渐降低。一方面, 由于孔隙中水的体积逐

渐增大, 孔隙的连通性得到了改善, 为电流的传导提供了优势通道, 使电阻率逐渐减小; 另一方面, 体积含湿率的增大使孔隙流体电阻率减小, 从而使整个试样的电阻率减小。

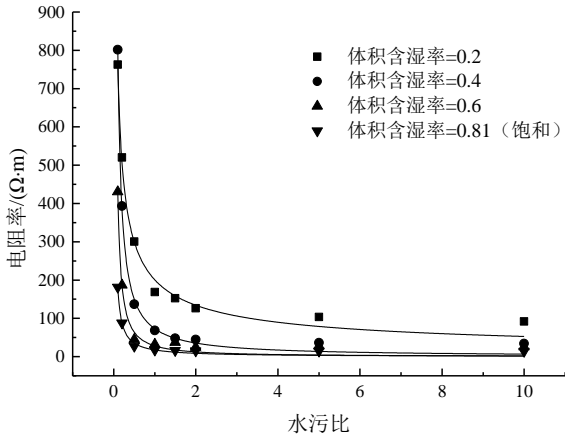


图 10 污染土电阻率与水污比的关系

Fig. 10 Relationship between resistivity of contaminated soil and water-contaminant ratio

3.4 正交试验结果分析

为了分析孔隙中水和污染物的含量以及土体孔隙率对试样电阻率的影响程度, 选取了体积含水率、体积含污率、孔隙率为正交试验的 3 个因素, 因素水平表如表 2 所示, 绘制各因素与电阻率指标之间的关系, 试验结果如图 11 所示。

表 2 正交试验因素及水平
Table 2 Orthogonal test factors and levels

因素	A	B	C
	体积含水率	体积含污率	孔隙率
水平 1	0.2	0.1	0.41
水平 2	0.3	0.2	0.45
水平 3	0.4	0.3	0.48

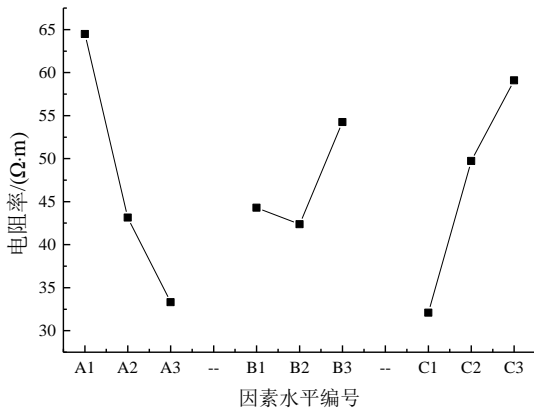


图 11 正交试验各因素变化与电阻率的关系

Fig. 11 Relationship between the variation of each factor and resistivity in orthogonal test

由结果可知, 土体电阻率随着体积含水率的增加而降低, 随着体积含污率的增加而增加, 随着孔隙率的增大而增大。通过极差分析可知, 本次试验中各因素的主次顺序为: 体积含水率、孔隙率、体积含污率。

4 结果与讨论

本文试验中主要探讨了水饱和、污染物与水共同饱和、非饱和 3 种状态下土体的电阻率特性, 明确了 MTBE 污染土电阻率随各因素的变化规律。主要结论如下:

(1) 对交流电测试频率、时间两个环境因素对试样电阻率的影响进行了测量, 结果表明, 土体电导率随测试频率的增加逐渐增加, 在 1~100 kHz 范围内变化比较平缓; 土体电阻率随着测试间隔时间的延长逐渐增大, 且变化速率越来越快, 同时, 体积含水率越小, 电阻率变化幅度越大。

(2) 与砂土不同, 水饱和黏土的地层因子与孔隙率在双对数坐标下呈正相关关系, 推测该现象与黏土颗粒表面所带的电荷有关, 土体孔隙率越大, 试样中土颗粒总体积越小, 所带的电荷总数越少, 因此使土体电阻率升高。

(3) 饱和污染黏土孔隙中由非水相污染物与水共同填充, 其电阻率随着水饱和度的增加呈幂函数形式降低, 该变化过程与孔隙的连通性有关; 另一方面, 饱和污染黏土的电阻率随着土体干密度的增大而逐渐减小, 在水饱和度较低时比较明显, 当水饱和度较高时趋势逐渐减弱。

(4) 为了更加客观描述土体孔隙中水、污染物的含量, 本文引入了两个参数: 体积含水率、体积含污率, 分别表示土体中水的体积、污染物的体积与土颗粒体积之比。在非饱和土的电阻率特性试验中, 主要考虑了体积含水率、体积含污率、体积含湿率 3 个因素的影响。试验结果表明: 当体积含污率一定时, 土体电阻率随着体积含水率的增大而呈幂函数形式降低; 当体积含水率一定时, 土体电阻率随着体积含污率的增大而线性增加; 当水污比一定时, 土体电阻率随着体积含湿率的增大而减小。

(5) 由正交试验可知, 土体体积含水率、体积含污率、孔隙率 3 个因素对土体电阻率的影响程度主次顺序为: 体积含水率、孔隙率、体积含污率。

目前对土体电阻率随各种控制因素的变化规律的研究逐渐增多^[22-23], 但是在实际环境中影响土体电阻率的因素远远多于室内试验所考虑的因素, 所以对多种因素综合作用下的土体电阻率变化规律需要更进一步的研究。

参考文献

- [1] 韩立华. 电阻率法在污染土评价与处理中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
HAN Li-hua. Application of resistivity method in the evaluation and treatment of contaminated soil[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [2] 白兰. 物探方法在污染场地中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
BAI Lan. Research on the application of physical exploration methods in contaminated sites[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [3] 潘玉英, 童奕涵, 朱根民, 等. 非均质含水土层中石油运移的电阻率监测[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 771-779.
PAN Yu-ying, TONG Yi-han, ZHU Gen-min, et al. Resistivity monitoring of petroleum transport in non-homogeneous aquifer[J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 771-779.
- [4] 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. Influence of water and oil two-phase on the electrical resistivity of oil contaminated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 39(1): 170-177.
- [5] 马玉慧, 杨悦锁, 范伟, 等. 包气带土壤含水率和石油类污染特性对电阻率监测的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 299-303.
MA Yu-hui, YANG Yue-suo, FAN Wei, et al. Influence of soil water content and petroleum contamination characteristics on resistivity monitoring in the air pocket[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 299-303.
- [6] ARCHIE G E. The electric resistivity log as aid in deternfining some reservoir characteristics[J]. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146: 54-61.
- [7] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical Methods in Geophysical Prospecting[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [8] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, 8(2): 107-122.
- [9] MITCHELL J K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. New York: Wiley & Sons, 1993.
- [10] 刘汉乐, 周启友, 陈余道. 多孔介质中轻非水相液体污染物多相流体系的电阻率特性试验研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(2): 23-28.
LIU Han-le, ZHOU Qi-you, CHEN Yu-dao. Experimental study on the resistivity characteristics of a multiphase flow system of light non-aqueous liquid contaminants in porous media[J]. Environmental Pollution & control, 2010, 32(2): 23-28.
- [11] 边汉亮, 刘松玉, 蔡国军, 等. 柴油污染粉质黏土的电导率特性及影响因素[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2017, 38(8): 1177.
BIAN Han-liang, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Resistivity properties and influencing factors of diesel-contaminated pulverized clay[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2017, 38(8): 1177.
- [12] 潘玉英. NAPLs 地下运移控制因素及监测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
PAN Yu-ying. Study on controlling factors and monitoring technology of NAPLs underground migration[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [13] 孙建国. 阿尔奇 (Archie) 公式: 提出背景与早期争论[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 472-486.
SUN Jian-guo. Archie's formula: background and early debates[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 472-486.
- [14] SHAH P H, SINGH D N. A simple methodology for determining electrical conductivity of soils[J]. Journal of ASTM International, 2004, 1(5): 1-11.
- [15] 刘志彬, 许翀. 土电阻率测试中的几个基本问题[J]. 公路, 2010(9): 187-192.
LIU Zhi-bin, XU Chong. Several fundamental issues in soil resistivity testing[J]. Highway, 2010(9): 187-192.
- [16] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电导率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87.
LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Resistivity properties of soils and their engineering

- applications[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 83-87.
- [17] 刘华, 胡文乐, 王铁行, 等. 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[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 53(3): 337-343.
LIU Hua, HU Wen-le, WANG Tie-xing, et al. Experimental study on the effect of water content and compaction on the resistivity characteristics of acid-alkaline contaminated remodeled loess[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition*, 2021, 53(3): 337-343.
- [18] 王炳辉, 王志华, 姜朋明, 等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(9): 1739-1745.
WANG Bing-hui, WANG Zhi-hua, JIANG Peng-ming, et al. Resistivity characteristics of saturated sandy soils with different porosity[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9): 1739-1745.
- [19] 周明园, 王炳辉, 吴迪, 等. 砂土电阻率特性的室内试验研究[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 32(1): 134-138.
ZHOU Ming-yuan, WANG Bing-hui, WU Di, et al. Indoor experimental study of resistivity properties of sandy soils[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2018, 32(1): 134-138.
- [20] YOON G, OH M, PARK J. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. *Environmental Geology*, 2002, 43(1): 18-28.
- [21] SON Y, OH M, LEE S. Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz-10 MHz[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(6): 1341-1348.
- [22] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚, 等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(1): 151-155.
GUO Xiu-jun, LIU Tao, JIA Yong-gang, et al. Experimental study on the relationship between engineering mechanical properties of soils and their resistivity[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(1): 151-155.
- [23] 张永霞. 污染土的电阻率特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
ZHANG Yong-xia. Resistivity characteristics of contaminated soils[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.



(上接第 28 页)

- [23] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(4): 587-598.
- [24] WU C, CHU J, WU S, et al. 3D characterization of microbially induced carbonate precipitation in rock fracture and the resulted permeability reduction[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 23-30.
- [25] WU C, CHU J, CHENG L, et al. Biogrouting of aggregates using premixed injection method with or without pH adjustment[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(9): 1-6.