

文章编号: 1007-2993(2026)03-0452-07

水-盐作用下粉质黏土电阻率特征研究

韩海龙 陈琳

(北京得力合科技集团有限公司, 北京 100025)

【摘要】厘清水分和盐分影响下的粉质黏土电学性能演化规律,有助于扩大黏性土地区的岩土工程勘察技术的野外应用范围和提升综合地球物理勘探方法的准确性。针对粉质黏土区的电性特征需求,本研究系统考察了水-盐作用对粉质黏土电阻率特征的影响。试验选用采自山西省临汾市的粉质黏土样本,采用数字电桥探测仪器对试样在 100 ~ 10000 Hz 频率范围内进行电阻率测试,控制含水量为 8% ~ 18%、含盐量为 0% ~ 6%。结果表明:电阻率随含水量增大呈指数下降,以塑限附近为转折点;随着含盐量增大,电阻率先快速下降后趋于平稳;电阻率随测试频率升高而降低;在较干燥状态下,电阻率对盐分变化更为敏感。基于土体固-液-气三相导电通路模型和扩散双电层结构,对上述规律进行了机理分析。研究结果可为粉质黏土区的电法勘探与电性参数识别提供基础依据,对提高电法探测精度具有重要意义。

【关键词】粉质黏土;电阻率;含水量;含盐量;双电层**【中图分类号】** TU411**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0090

Characterization of electrical resistivity of silty clay under water-salt interaction

HAN Hailong CHEN Lin

(Beijing Delhi Technology Group Co., Ltd., Beijing 100025, China)

【Abstract】 Clarifying the evolution of electrical properties of silty clay under the influence of moisture and salinity is essential for expanding the field application of geotechnical investigation technologies in cohesive soil areas of northern China and improving the accuracy of integrated geophysical exploration methods. Aiming at the demand for electrical characterization in silty clay regions, this study systematically investigates the effects of water-salt interaction on the resistivity characteristics of silty clay. Laboratory tests were conducted on silty clay samples collected from Linfen, Shanxi Province, using a digital bridge instrument over a frequency range of 100 ~ 10000 Hz. Water content was controlled between 8% and 18%, and salt content ranged from 0% to 6%. The results show that the soil resistivity decreases exponentially with increasing water content, with an inflection point near the plastic limit. As salt content increases, resistivity first decreases rapidly and then tends to stabilize. Resistivity decreases with increasing frequency, and its sensitivity to salinity is more pronounced under low water content conditions. The observed trends were interpreted based on a solid-liquid-gas three-phase conductive path model and the diffuse double layer structure of clay. The findings provide a theoretical basis for electrical prospecting and electrical parameter identification in silty clay regions, which is of significance for enhancing the precision of resistivity-based geophysical methods.

【Key words】 silty clay; electrical resistivity; water content; salt content; double diffuse layer

0 引言

粉质黏土在全球分布广泛,在水-盐作用影响下,其结构和强度易发生显著变化,如强度劣化或结构退化,进而诱发土体工程灾害^[1]。因此,研究水-盐作用对土体岩土性能的影响已成为近年来的研究热点^[2]。受限于设备成本、资金投入、人员专业性及技术适用性等因素,传统的岩土工程勘察方法在实际工程应用中常面临数据采集效率低、原位信息缺失及测试周期冗长等问题。自 1942 年 Archie 提出经典

Archie 公式并建立非饱和砂土电阻率模型以来,电阻率测试技术凭借其原位无损检测、三维空间覆盖性及高效数据采集等优势,逐渐成为土体参数反演与环境岩土监测领域的研究热点。

电阻率测试技术通过电学参数与土体物理力学性质间的定量关联,为土体孔隙结构、含水率及污染物迁移等关键指标的动态监测提供了新途径。尽管电阻率测试技术已取得进步,但其应用仍受限于多源误差耦合效应,包括电极-土体接触阻抗变异、地下

异质体边缘效应及反演模型假设偏离等。这些误差导致不同研究中对同一土体的电阻率测试结果存在显著离散性,进而影响工程参数的可靠性评价。因此,如何通过标准化测试流程与误差补偿机制降低数据不确定性,是提升该技术工程适用性的关键研究方向。

近年来,电阻率测试技术在岩土工程、地球物理、土壤科学和农业科学等领域得到广泛应用^[3],用于体积含水量测量、水力导率评估、土壤盐度分析、接地系统设计、土壤力学性能调查以及孔隙信息和土壤渗透性评价^[4-6]。研究表明,影响土壤电阻率的因素包括含水量、含盐量、饱和度、孔隙结构和土壤类型^[7]。Clavier等^[8]、Fukue等^[9]在不同含水量和温度条件下,对黏土颗粒的扩散双层结构和离子运动特性进行了分析和扩展,借助测得的电阻率结果,对黏土微观结构模型进行了讨论与分析。同时,Lyu等^[10]测试了不同含盐量和含水量条件下的黏土电阻率,提出了在冻融过程中的盐渍土电阻率预测模型。Bai等^[11]测试了黏土电导率随不同温度、含水量、干密度及不同土壤内部结构的变化规律。An等^[12]研究了多尺度黏土裂纹的产生、传播和聚集过程中的电阻率演化特征,为电阻率方法的应用提供了基础参考和技术借鉴。此外,相较于直流电场的种种弊端,引入交流测试频率对电阻率测量结果的影响引起了许多研究者的关注。McNeill^[13]和Abu-hassanein^[14]描述了测试频率过程中电阻率的波动行为,刻画了电阻率的变化规律。尽管已有研究探讨了不同含水量和含盐量条件下土体电阻率的变化规律,但对于中国北方地区广泛分布的盐渍化粉质黏土的电阻率演化规律与机理,目前仍尚未明确。

探究中国北方广泛分布的粉质黏土电阻率演化特征,主要从含水量和含盐量两个角度出发。分析含水量和含盐量影响下电阻率的变化规律,探究水-盐作用下土体导电路径的变迁与演化,结合土体固-液-气三相导电模型,分析粉质黏土在水-盐作用下电阻率演化机理。研究结果可为粉质黏土电阻率工程特性预测、电阻率观测技术大规模野外应用、土地资源利用及北方粉质黏土地区工程建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选取山西省临汾市黄土高原地区的粉质黏土作为试验材料。采样区地处干旱半干旱气候带,蒸发强烈,土壤中可溶性盐分累积明显,主要以氯化钠(NaCl)形式存在,占可溶性盐总量的70%以上。

采集后的原状土样立即装袋密封,运回实验室后进行预处理。为减少原生盐分对试验结果的影响,采用去离子水对土样进行多次淘洗处理,直至洗液清澈,以充分去除原生可溶性盐分和有机质^[15]。每批土样以蒸馏水浸泡并搅拌30 min,自然沉降后弃去上清液,重复3次以上。随后,将处理后的土样在110℃烘箱中烘干至恒重,并用橡胶锤轻击破碎,去除大块土块,通过2 mm筛网筛分,以剔除剩余杂质^[16]。筛分后的洁净土粉用于后续试验。试验用土的物理力学性质指标、化学组分和矿物组分分别见表1、表2和表3。根据土样粒径级配曲线(见图1),试验用土为典型黏性土。上述测试方法严格遵照美国材料测试协会(ASTM)提供的标准测试流程。

表1 试验用土的物理力学指标
Tab. 1 Basic properties of the tested soil

密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%	孔隙比	比重	饱和度/%	液限/%	塑限/%
1.51	6.2	0.826	2.71	27.6	25.1	16.1

表2 试验用土的化学组分
Tab. 2 Chemical components of the tested soil

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
54.04	11.26	8.67	4.95	1.65	1.49

表3 试验用土的矿物组分
Tab. 3 Mineral components of the tested soil

石英	伊利石	绿泥石	钠长石	方解石	蒙脱石
28	22	17	12	9	5

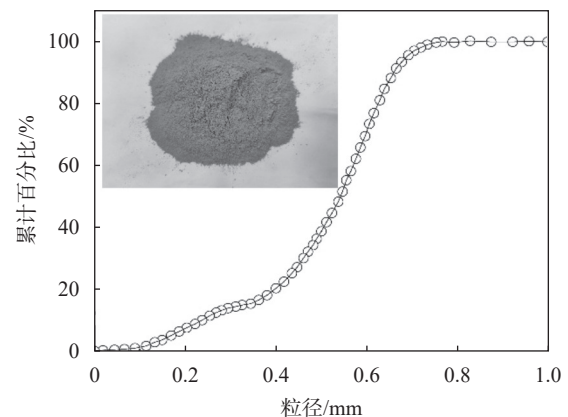


图1 试验用土粒径级配曲线
Fig. 1 Particle size distribution of the tested soil

1.2 样品制备

为研究含水量和含盐量对土体电阻率的影响,按预先设计的试验方案,将筛分后的土样与不同质量的蒸馏水和分析纯氯化钠(纯度99%)混合,配置成

含水量为 8%~18%、含盐量为 2%~6% 的混合土体。此处,含水量和含盐量分别指去离子水和盐分固体质量(分析纯,99%)占干燥土体质量的百分比。详细的试验方案设计和样品组数情况如表 4 所示。混合后的土样立即用保鲜膜密封包裹,置于 20 ℃ 条件下静置 48 h,以确保样品内部含水均匀分布。

表 4 试验方案设计
Tab. 4 Experimental program design

序号	含水量/%	含盐量/%	序号	含水量/%	含盐量/%
1	8	0	13	14	0
2	8	2	14	14	2
3	8	4	15	14	4
4	8	6	16	14	6
5	10	0	17	16	0
6	10	2	18	16	2
7	10	4	19	16	4
8	10	6	20	16	6
9	12	0	21	18	0
10	12	2	22	18	2
11	12	4	23	18	4
12	12	6	24	18	6

混合土体充分均匀后,采用数控万能压力机和空心圆柱形模具,借助静力压实法制作尺寸为 39.1 mm(直径)×30.0 mm(高)、干密度为 1.7 g/cm³ 的圆柱形样品。在样品制备过程中,精确控制混合土样的质量,保证每个样品的体积和密度相同,从而大大降低试验误差。试验过程中采用式(1)来控制每个样品的干密度^[17]:

$$m = v\rho(1+w) \quad (1)$$

式中: m 为制备一个圆柱状压实土样所需要的粉末状膨润土的质量, g; v 为土样的体积, cm³; ρ 为土样的密度, g/cm³; w 为土样的含水量, %。在采用位移控制法压样过程中,严格控制压样速率为 0.1 mm/min,压杆到预定位置后静置 1 h,可有效抑制卸荷回弹并降低对试验结果的影响^[18]。

1.3 测试仪器与方法

为深入探讨水-盐作用对粉质黏土电阻率特性的影响,采用 Tonghui 2840 型精密数字电桥系统进行电阻率测试,测试设备示意图如图 2 所示。该设备具备高精度和宽频率响应范围,适用于岩土材料的电学特性研究。测试过程中,采用两端铜质电极配置,将电极紧密接触于样品的上下端面,确保良好的电接

触,以减少接触电阻对测量结果的影响。考虑到过低的测试频率会导致明显的电极极化和界面极化效应,从而引起阻抗增加,最终导致测量结果出现偏差。同时当频率升高超过一定临界值后,高频所引起的电容效应增强,过高的频率使得阻抗偏离实际值,引起测量结果不稳定。综合考虑之下,为全面评估频率对电阻率测量的影响,测试频率设置为 100, 1000, 10000 Hz 三个档位。在每个频率下,对每个样品进行 5 次重复测量,并取其平均值作为最终电阻率数据,以提高数据的可靠性和重复性^[19]。土样电阻率可以用如下公式计算^[20]:

$$\rho = RS/L \quad (2)$$

式中: ρ 为土样电阻率, $\Omega \cdot m$; R 为试验测量的土样电阻, Ω ; S 为样品的横截面积, m²; L 为样品的高度, m。

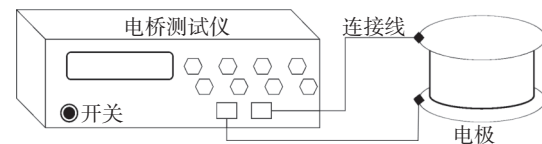


图 2 电阻率测试设备
Fig. 2 Test equipment for the electrical resistivity

此外,为确保测试环境的稳定性,所有测试在室温(约 25 ℃)条件下进行,避免温度波动对电阻率测量的潜在影响。通过上述方法,获得了高质量的电阻率数据,为后续分析水-盐作用下粉质黏土的电学行为提供数据基础。

2 结果与讨论

2.1 含水量的影响

图 3 展示了在不同含盐量条件下,含水量对土体电阻率的影响规律。试验频率分别为 100, 1000, 10000 Hz, 对应图 3(a)—图 3(d)的含盐量依次为 0%, 2%, 4% 和 6%。结果表明,电阻率均随含水量的增加而显著降低,且在低频(100 Hz)下电阻率最高,高频(10000 Hz)下最低,表现出明显的频率依赖性。在相同含水量下,随着含盐量的升高,电阻率整体呈下降趋势,说明溶解盐分的导电能力对电性特征有显著增强作用。

为说明电阻率 ρ 与含水量 w 之间的关系,图 4 定义归一化电阻率为电阻率与土体含水量 8% 时对应电阻率的比值。土体电阻率与含水量之间的关系呈指数函数,可以用式(3)来描述:

$$\rho = \exp(a + bw + w^2) \quad (3)$$

式中 a 和 b 为拟合参数。

由图 4 可以看出,电阻率随着含水量增加呈现

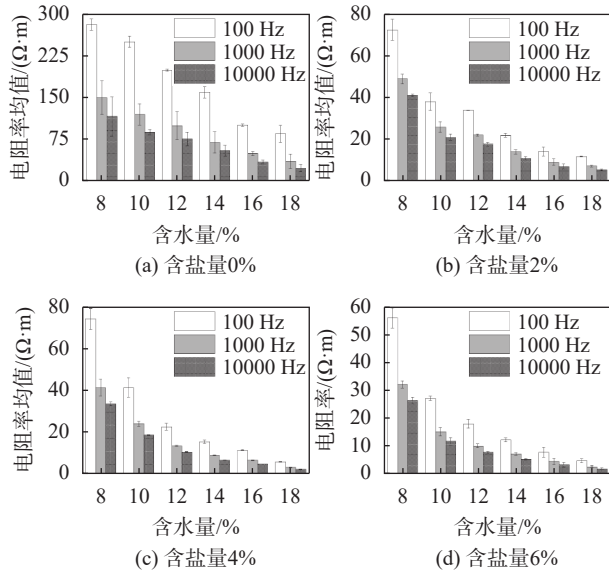


图3 不同含盐量条件下含水量对电阻率的影响
Fig. 3 Effect of water content on electrical resistivity under different salt content conditions

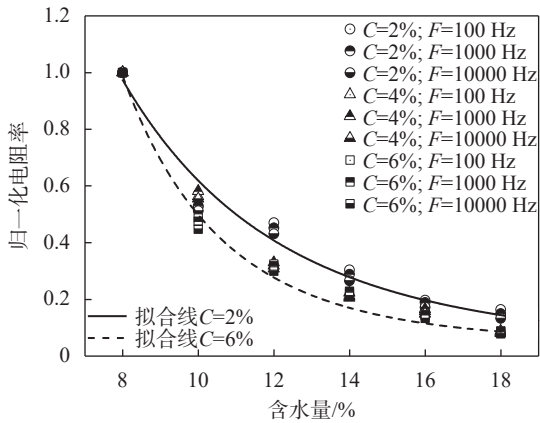


图4 含水量作用下的归一化电阻率
Fig. 4 Normalized electrical resistivity under the influence of water content

指数型降低,表明水作为导电性较强的介质,参与了土体导电路径的重塑,改变了土体的导电模型。

2.2 含盐量的影响

图5展示了不同含水量条件下,含盐量对土体电阻率的影响。图5(a)—图5(f)分别对应含水量为8%,10%,12%,14%,16%和18%。在各频率(100,1000,10000 Hz)下,电阻率均随含盐量的增加而迅速下降,且在含盐量达到2%后趋于平稳。该趋势在低含水量条件下尤为显著,电阻率下降幅度较大,表明盐分对电性特征的影响在干燥状态下更为敏感。此外,频率越高,电阻率越低,仍表现出明显的频率依赖性。整体结果表明,含盐量是影响土体导电能力的主控因素之一,尤其在低含水状态下,其主导效应更为突出。

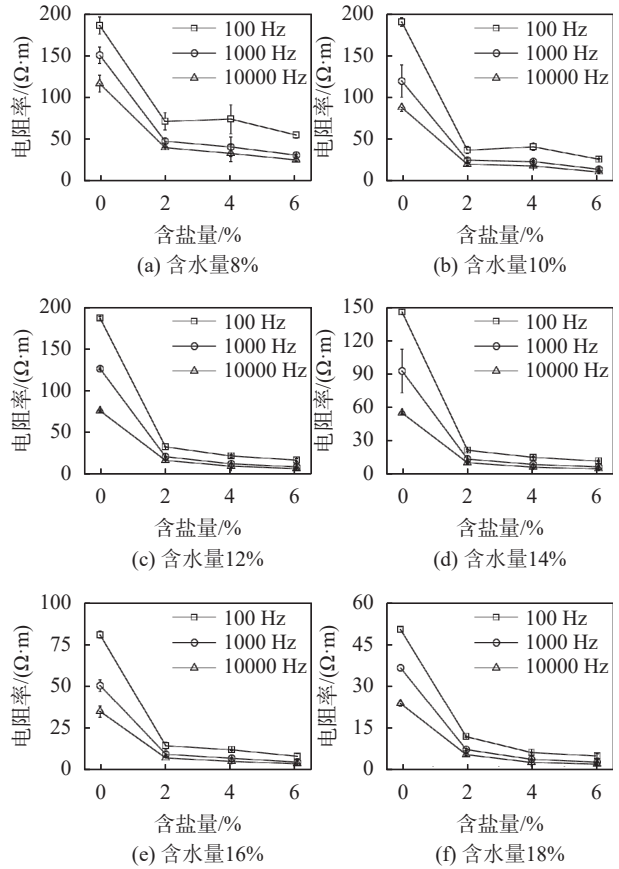


图5 不同含水量条件下含盐量对电阻率的影响
Fig. 5 Effect of salt content on electrical resistivity under different water content conditions

图6为归一化电阻率与含盐量之间的关系。归一化电阻率定义为所有电阻率与含盐量为0%时的土体电阻率的比值。电阻率 ρ 与含盐量 C 之间的关系可用式(4)描述:

$$\rho = a + b^C \quad (4)$$

式中 a 和 b 为拟合参数。

由图6可以看出,电阻率随着含盐量增加呈现快速降低趋势,表明盐分离子所主导的水-盐反应控制着土体电阻率的演化,充分的水-盐反应便利了土体的导电性能,导致土样整体电阻率降低。

2.3 土体导电模型

随着研究人员对土体结构了解的深化,土体电导率模型近些年来持续演进。如图7所示,从固体土颗粒接触点导电模型(路径1),到连续自由孔隙水导电模型(路径3),再到固体颗粒交替层、固体颗粒周围的双层结构和孔隙水(路径2),最终形成多相复杂导电路径模型^[21](见图7)。

研究表明,水比大多数固体和空气具有更好的导电性^[22-23]。在含水量较低时,导电主要依赖固体颗粒之间点对点接触的有限路径进行导电。此时电阻

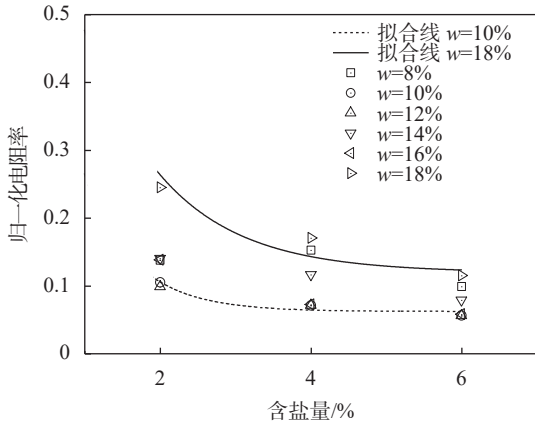


图6 含盐量作用下的归一化电阻率

Fig. 6 Normalized electrical resistivity under the influence of salt content

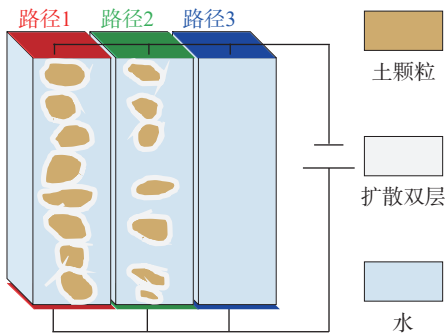


图7 土体三通道导电模型

Fig. 7 Three-channel conduction model of soil mass

率较高。随着含水量的增加,毛细水膜逐渐增厚并联通,导电路径2逐渐形成。此时,孔隙连通性显著提高,携带电荷的水中离子(如 H^+ 、 OH^-)数量增多,土样整体导电能力迅速增强。同时,原有的颗粒间胶结物(如盐晶体或黏粒表面的吸附水膜)逐渐溶解或者松散,使得导电路径1和2的相对贡献降低。随着含水量的增加,土体电阻率逐渐降低。含水量的进一步增加,导致土样中导电主要由路径3来承担,而路径2上的离子簇扩散达到极限,再增加含水量对导电率的提升作用减弱。图7模型进一步说明了溶液浓度对导电通路的影响。随含盐量从0%开始增加,土壤孔隙中的NaCl溶解产生大量 Na^+ 和 Cl^- 离子,水膜和扩散层内的自由移动离子数量显著增多,路径1和路径2的电导率迅速提升。在低含盐量条件下,少量离子的引入即显著增强了沿双电层的导电能力。随着含盐量进一步增加(约2%以上),双电层中的离子浓度趋于饱和,新增加的盐分对整体导电性的边际提升减弱,因此电阻率下降曲线出现缓和趋势。

结合以往的研究成果,基于土体固-液-气三相结构和扩散双层结构的导电模型如图8所示。结合上述归一化方法获取的拟合公式,本文对土体电阻率

特性进行了如下的分析和讨论。如图8所示,土粒表面的扩散双电层结构:黏土颗粒负电荷表面吸附阳离子形成固定层和扩散层。随着NaCl含量增加,双电层扩散层内可移动自由离子的数量激增,使沿粒子表面的导电通路明显加强。在低含盐量时,扩散层较厚,新增离子可以快速填充离子簇、显著增强导电;当含盐量升高至约2%时,扩散层厚度接近极限,离子簇接近饱和,此后继续增加盐分对导电能力的提升效果递减,形成电阻率快速下降后的拐点。此后导电路径主要依赖于自由水膜通道(路径3),电阻率不再显著变化。

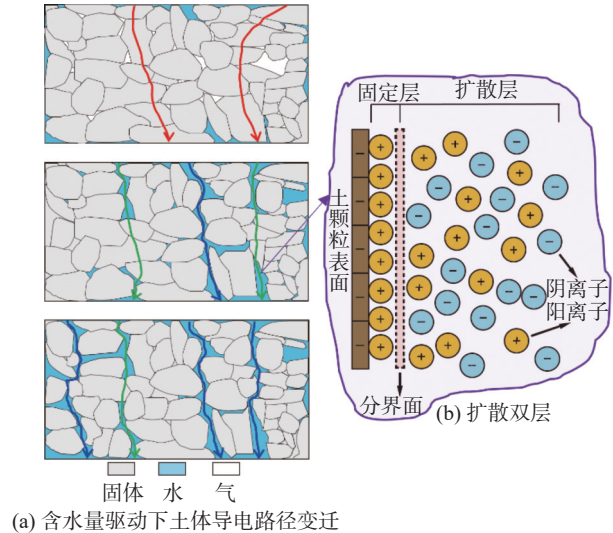


图8 基于三相结构的土体导电模型

Fig. 8 Conductive model of soil based on three-phase structures

土体电导率依赖于导电离子^[24]。大多数离子存在于土体颗粒的扩散双层结构和土体孔隙中的游离水中(见图9)。当 Na^+ 和 Cl^- 进入粉质黏土时,扩散双层中自由移动离子的数量增加,土体颗粒之间的间隙也增加。在测试频率的作用下,这些离子可以进行定向运动,形成电流路径,从而提高了土体的电导率。由图6可知,当氯化钠含量较低时,可形成导电路径的离子数量有限,粉质黏土电阻率较大。当氯化

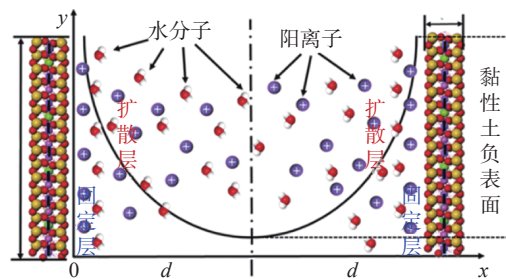


图9 黏性土扩散双层结构分子示意图

Fig. 9 Molecular model of diffuse double layers structure for clay

钠含量在 2% 左右时,导电路径中离子含量的增加增强了粉质黏土的电导率。随着氯化钠含量的不断增加,电阻率逐渐降低。

3 结论

采用山西省临汾市的粉质黏土为研究对象,在 100 ~ 10000 Hz 的试验频率下,得到了不同含水量和含盐量粉质黏土的电导率。同时,利用黏性土的固-液-气三相组分结构、扩散双层结构和三条导电路径来探讨土体的电阻率特性。提出了在含水量和含盐量影响下的土体电阻率变化的经验公式,为今后类似地质材料电阻率研究提供了依据。主要结论如下:

(1)试验结果表明,中国北方典型粉质黏土的电导率随含水量增加而显著降低,且在不同频率下均表现出明显的频率依赖性,频率越高,电阻率越低,反映出含水量和测试频率对土体导电性能的协同影响。

(2)在各含水量条件下,电阻率均随含盐量的增加迅速下降,尤其在 0% ~ 2% 含盐量区间下降幅度最大,之后趋于稳定,说明溶解盐分对电导特性的增强作用在早期最为明显。盐分离子增加所引起的黏性土颗粒周围扩散双层结构变化,继而引起了土体内部导电路径的变化。导电能力较强路径随着盐分含量的增加而逐渐增多,最终导致粉质黏土整体电阻率降低。

(3)含水量与含盐量对电阻率的影响存在耦合效应,特别是在干燥状态下,电阻率对盐分变化更加敏感。因此,在对该类地区性粉质黏土进行电性参数测试或现场电法应用时,应综合考虑水盐条件与频率响应的协同调控效应。其中,土体固-液-气三相组分随着含水量和含盐量增加所导致的水-盐反应强度变化而发生改变,最终导致土体内部三种导电路径的变化。

实际上,随着北方地区工程建设的推进,各种复杂场地条件、水文条件、气候特征等导致的岩土体电阻率异化问题将频繁发生。然而,工程建设所用的室外大规模电阻率探测技术的广泛应用,需要充分掌握研究区域内地质体的电阻特征。详细且充分的室内电阻率调查是保障野外物探技术准确性的关键。鉴于多因素耦合影响下电阻率调查的复杂性,室内试验与工程建设场地环境的差异性,土体电阻率的演化特征仍需更深入细致的研究。

参 考 文 献

[1] NIU X R, YAO Y P. Resilient modulus experiment of subgrade soil on different wetting-drying and salt

washing-supplying paths[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100512.

- [2] DUAN Z, CHENG W C, PENG J B, et al. Investigation into the triggering mechanism of loess landslides in the south Jingyang platform, Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4919-4930.
- [3] NASEEM A, JALAL F E, NASEEM A. Predicting sandy-clayey soil properties using electrical resistivity testing[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2019, 173(1): 21-29.
- [4] 蔡波,徐兴倩,屈新,等.红黏土电阻率影响因素分析及其预测模型构建[J].*水电能源科学*, 2023, 41(11): 169-173. (CAI B, XU X Q, QU X, et al. Analysis of influencing factors of laterite resistivity and its prediction model construction[J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(11): 169-173. (in Chinese))
- [5] 陈议城,宋宇,陈学军,等. Cu^{2+} 污染红黏土电阻率特征试验研究[J/OL]. *岩土力学*, 2020,(S2):1-10[2025-03-01]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0137>. (CHEN Y C, SONG Y, CHEN X J, et al. Resistivity characteristics of red clay contaminated by Cu^{2+} [J/OL]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020,(S2):1-10[2025-03-01]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0137>. (in Chinese)).
- [6] 查甫生,刘松玉,杜延军,等.土的颗粒组成对电阻率的影响试验研究[J].*工业建筑*, 2013, 43(3): 71-74. (ZHA F S, LIU S Y, DU Y J, et al. Effect of soil grain composition on soil electrical resistivity[J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(3): 71-74. (in Chinese))
- [7] HASAN M F, ABUEL-NAGA H, BROADBRIDGE P, et al. Series-parallel structure-oriented electrical conductivity model of saturated clays[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 162: 239-251.
- [8] CLAVIER C, COATES G, DUMANOIR J. Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1984, 24(2): 153-168.
- [9] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements[J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1/2): 43-53.
- [10] LYU C, SUN Q, ZHANG W Q, et al. Effects of NaCl concentration on electrical resistivity of clay with cooling[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 170: 103843.
- [11] BAI W, KONG L W, GUO A G. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, 5(5): 406-411.

- [12] AN N, TANG C S, CHENG Q, et al. Application of electrical resistivity method in the characterization of 2D desiccation cracking process of clayey soil[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105416.
- [13] MCNEILL J D. 7. Use of electromagnetic methods for groundwater studies[J]. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 1990, 1: 191-218.
- [14] 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.
- [15] HU W L, CHENG W C, WEN S J, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties[J]. *CATENA*, 2021, 203: 105361.
- [16] 丁旭升, 张凌凯, 樊培培. 干湿冻融循环条件下重塑性黄土的强度劣化规律及非线性模型研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(S1): 324-336. (DING X S, ZHANG L K, FAN P P. Strength degradation law and nonlinear model of remolded loess under dry-wet freeze-thaw cycles condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(S1): 324-336. (in Chinese))
- [17] YE W M, ZHANG F, CHEN B, et al. Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(7): 2621-2630.
- [18] CHEN Y G, CAI Y Q, PAN K, et al. Influence of dry density and water salinity on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite-sand mixtures[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(5): 1879-1896.
- [19] 蒋超, 晏长根, 辛远, 等. 水泥土电阻率对测试频率与含水率的响应特征试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(7): 52-59. (JIANG C, YAN C G, XIN Y, et al. Experimental study on response characteristics of cement-soil resistivity to test frequency and water content[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(7): 52-59. (in Chinese))
- [20] 赵迎宵, 何伟鹏, 丁晓英, 等. 西宁盆地黄土区草本植物边坡电阻率与土体物理力学性质关系研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(2): 477-488. (ZHAO Y X, HE W P, DING X Y, et al. Relationship between resistivity and soil physical and mechanical properties of herbaceous slopes in the loess area of Xining Basin[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(2): 477-488. (in Chinese))
- [21] 龚晓南, 焦丹, 李瑛. 粘性土的电阻计算模型 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2011, 33(2): 213-218. (GONG X N, JIAO D, LI Y. Electric resistance calculation model of clay[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2011, 33(2): 213-218. (in Chinese))
- [22] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 土的微结构特征对其电阻率的影响试验研究 [J]. *工程勘察*, 2008(10): 6-10. (ZHA F S, LIU S Y, DU Y J, et al. Effect of microstructure on soil electrical resistivity[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008(10): 6-10. (in Chinese))
- [23] 刘华, 胡文乐, 王铁行, 等. 碱液加固黄土的电阻率特征试验及其效果评价 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(2): 99-107. (LIU H, HU W L, WANG T H, et al. Resistivity characteristics test and effect evaluation of alkali solution strengthening loess[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(2): 99-107. (in Chinese))
- [24] 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 H, HU W L, NIU Z L, et al. Experimental study on evolution of resistivity characteristics of remodeled polluted Q₃ loess[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(10): 64-73. (in Chinese))

收稿日期: 2025-03-01