

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230114

红粘土电阻率影响因素分析及其预测模型构建

蔡波¹, 徐兴倩¹, 屈新², 彭光灿¹, 王海军¹, 陈小双¹

(1. 云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201; 2. 安阳工学院土木与建筑工程学院, 河南安阳 455000)

摘要: 电阻率法能有效反映土体物理指标和结构特性, 具有高效、便捷、无损等特点。以红粘土孔隙水、含水率及孔隙率为关键因素, 开展红粘土电阻率特性及其模型试验研究, 考虑到电极面积对测试电阻值的影响, 提出了接触电阻的修正公式, 并引入结构因子反映孔隙水对红粘土电阻率的影响, 建立红粘土电阻率预测模型。结果表明, 接触电阻修正公式能有效减少接触电阻的试验误差; 红粘土电阻率、结构因子随着含水率的增加而减小, 随着孔隙率的增加而增大, 均呈现出幂函数关系; 红粘土电阻率影响因素相关性为孔隙水 > 含水率 > 孔隙率; 以接触电阻、孔隙水、含水率和孔隙率为变量构建的红粘土电阻率预测模型, 拟合精度较高, 可为评价红粘土物理指标和结构特性提供参考。

关键词: 红粘土; 电阻率模型; 孔隙水; 影响因素

中图分类号: TU446; [TV16]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0169-05

1 引言

红粘土具有高孔隙比、高液限、低压缩等物理力学特性, 其分布区域常出现水土流失、滑坡泥石流及地基开裂变形等地质灾害问题。高密度电法则是获取岩土层工程地质信息的重要勘探手段, 其具有经济、便捷、快速等优势^[1]。AZHAR A 等^[2]基于电阻率法分析土体重金属污染运移特征, 为土体污染物调查研究提供了新手段; ARCHIE G E^[3]提出饱和和无粘性土的电阻率模型, 为反演土体微观结构提供了新方法; TUMID-AJSKI P J 等^[4]根据水泥胶结体系的结构因子建立了水泥土的电阻率模型; 龚晓南等^[5]优化了粘土三相并联电阻率模型, 证实该模型在电渗工程中具有可行性; 查甫生等^[6]通过电阻率法揭示了黄土变形物性演化规律, 指出电阻率模型能有效评价击实黄土的工程性质; MOSIEH A T 等^[7]以污染膨胀土的压实度、膨胀度等影响因素为基础, 利用电阻率模型揭示了污染膨胀土的电学特性。本文以含水率、孔隙水及孔隙率为变量开展红粘

土电阻率特性研究, 提出红粘土接触电阻率修正公式, 探讨孔隙水、含水率和孔隙率与结构因子之间的关系, 分析红粘土电阻率影响因素的敏感性, 进而构建红粘土电阻率预测模型, 旨在为红粘土工程性质无损评价提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

红粘土取自云南省昆明市, 取土深度 2~3 m, 为上更新统冲击层(Q₃^{al}), 呈棕红色, 其基本物理指标见表 1。试验所用 5 种孔隙水分别为孔隙水 1(白开水)、孔隙水 2(怡宝矿泉水)、孔隙水 3(农夫山泉矿泉水)、孔隙水 4(雨水)、孔隙水 5(自来水)。

表 1 红粘土的基本物理指标

Tab. 1 Basic physical property index of laterite

土样名称	最大干密度 ρ_d ($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	液限 ω_L	塑限 ω_P	比重 G_s	天然含水率 $\omega_o/\%$
红粘土	1.45	27.9	50.8	31.7	2.68	22.4

2.2 试验过程

将采集的试验用土风干、过 2 mm 筛后烘干,

收稿日期: 2023-02-01, 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 云南省基础研究计划面上基金项目(202101AT070271); 国家自然科学基金项目(41867040); 云南省高层次人才培养支持计划“青年拔尖人才”专项

作者简介: 蔡波(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程, E-mail: caibo7766@163.com

通讯作者: 徐兴倩(1986-), 男, 副教授、硕导, 研究方向为滑坡地质结构特征及形成机理分析, E-mail: xuxingqian_123@163.com

密封保存备用。配制不同孔隙水、含水率红粘土重塑土样,按照 6 种孔隙率(49.0%、51.0%、52.8%、54.5%、56.3%、58.2%)将每个试样分三次击实,将土体击实至与击实桶上边缘齐平达到预设孔隙率,长为 116 mm、直径为 102 mm 土柱试样。将制备好的试样放入土体电阻率测试设备中,两端安装电极连接数字电桥进行测试,同时数字电桥与电脑连接记录数据。

2.3 试验设备与原理

电阻率测试装置采用自制改进的 Miller Soil Box,有机玻璃管制成,规格与试验土样一致。电阻率测试设备选用 VC4090A 精密数字电桥,有效量程为 0.001 Ω~99.999 MΩ,在低频(100 Hz)、交流、二项电极条件下进行测试。根据土体导电性能测得土样的电阻值(R),并按电阻率公式计算土体电阻率值 ρ :

$$\rho = RS/L \tag{1}$$

式中, R 为土体电阻值; S 为试样横截面积; L 为电极间距。

3 红粘土电阻率影响因素分析

3.1 接触电阻

二相电极法能与土工试验仪器较好地结合应用,但测试结果受电极与试样的接触面积影响较大。因此,为有效减少接触电阻对测试结果的影响,首先分析电极面积对电阻率的影响。图 1 为二项电极法原理示意图。

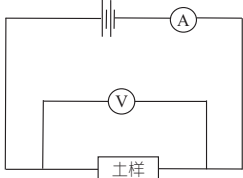


图 1 二项电极法原理示意图

Fig. 1 The principle diagram of binomial electrode method

试验选取 5 种面积的电极(81.67、52.78、30.18、17.27、3.14 cm²)、5 种含水率(19%、22%、25%、28%、31%)、3 种孔隙率(56.3%、52.8%、49.0%),研究电阻率与电极面积的关系。在不同含水率条件下,电阻值均随着电极面积的增加而减小,且两者之间具有良好的线性关系。

通过对 15 组电极面积与电阻值的试验数据进行空间曲面拟合,将公式中的截距作为接触电阻值,绘制接触电阻(R')关于含水率和孔隙率之间的变化关系,结果见图 2。由图 2 可知,接触电阻与含水率、孔隙率存在良好相关性,随着含水率

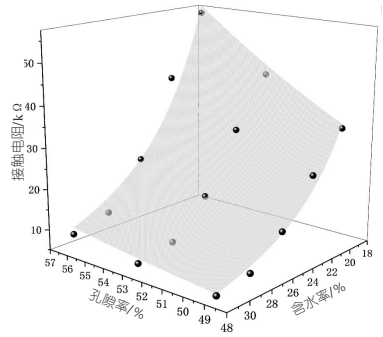


图 2 接触电阻与含水率和孔隙率之间的关系

Fig. 2 Relationship between contact resistance and water content and porosity

和孔隙率的增加接触电阻率逐渐减小。分析得到接触电阻与含水率、孔隙率之间的关系式为:

$$R' = 0.326n^{3.84}\omega^{-3.49} \quad R^2 = 0.969 \tag{2}$$

式中, R' 为接触电阻; n 为孔隙率; ω 为含水率。

整理后得到红粘土接触电阻率的修正公式为:

$$\rho = \rho_0 - \rho' = (R_0 - R')S/L \tag{3}$$

式中, ρ_0 为实测电阻率; ρ' 为接触电阻率; R_0 为实测电阻。

3.2 孔隙水电阻

以孔隙水 1~5 为例,使用自制电阻率测试装置进行测试。不同类型孔隙水的电阻率与饱和红粘土电阻率关系见图 3。由图 3 可知,5 种孔隙水之间的电阻率相差甚远,对红粘土电阻率值影响差异性较大,因为不同类型的水经过不同工艺和技术的加工,导致水中离子的种类和数量占比不同。将 5 种孔隙水作为饱和红粘土孔隙水进行电阻率测试($\rho_d = 1.30 \text{ g/cm}^3$),每组做三个平行试样取平均值。结果见图 3,电阻率值大小依次为孔隙水 1>孔隙水 2>孔隙水 3>孔隙水 4>孔隙水 5。此外,5 种类型水所配置的饱和红粘土试样的电阻率均大于孔隙水自身电阻率,且孔隙水电阻率越大则红粘土电阻率越大,说明孔隙水电阻率的大小直接影响红粘土电阻率测试结果。

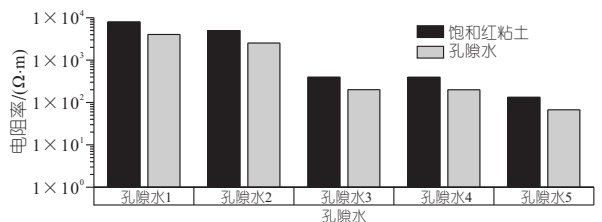


图 3 不同类型孔隙水的红粘土电阻率对比

Fig. 3 Comparison of resistivity of laterite with different types of pore water

结构因子(F)^[3]能够反映土体结构特征和孔隙大小,主要与孔隙率、土颗粒形状及排列方式等有关。利用结构因子评价红粘土试样电阻率,当红粘土干密度为 $\rho_d = 1.30 \text{ g/cm}^3$ 时,可以推算出

$F=1.98$ 。饱和红粘土电阻率试验值与计算值对比见图 4。由图 4 可知,在 $F=1.98$ 时,饱和红粘土电阻率的试验值与计算值之间相关性较好,说明结构因子能够直观反映孔隙水对红粘土电阻率的影响。

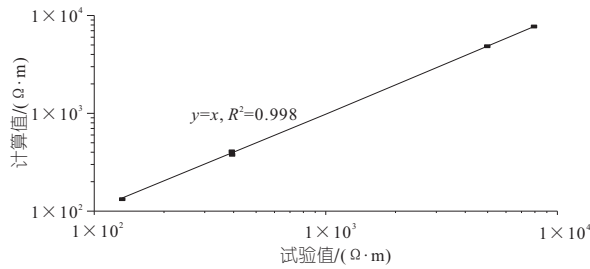


图 4 饱和红粘土电阻率试验值与计算值对比

Fig. 4 Comparison between experimental and calculated resistivity values of saturated laterite

3.3 含水率

选取含水率 19%、22%、25%、28%、31%、34% 及孔隙水 5 分析红粘土电阻率与含水率关系。不同孔隙率下红粘土电阻率与含水率关系见图 5。由图 5 可知,红粘土电阻率随着含水率的增加呈幂函数减小,不同孔隙率下的红粘土电阻率差值较大,随着含水率逐渐增加至最优含水率附近,红粘土电阻率差值变小。原因主要在于含水率较低时,土中孔隙水含量少,电流传播受阻,进而导致红粘土电阻率较大;随着含水率增加,土体内部形成有效孔隙水通道,电阻率急剧减小,当含水率达到最优含水率后,电阻率减小趋势放缓。

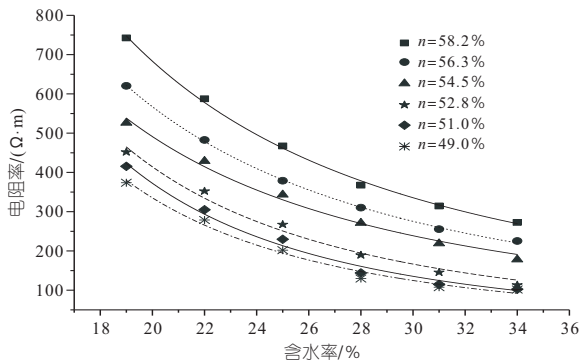


图 5 不同孔隙率下红粘土电阻率与含水率关系

Fig. 5 The relationship between resistivity and water content of laterite under different porosities

含水率与结构因子的关系见图 6。由图 6 可知,在不同孔隙率下,结构因子(F)与含水率之间拟合关系较好,呈幂函数关系减小,随含水率变化整体趋势与电阻率相似。表 2 为不同孔隙率下红粘土电阻率与含水率之间的拟合关系式。建立红粘土含水率与结构因子之间的关系式为:

$$F = \xi \omega^a \quad (4)$$

式中, ξ 、 a 均为拟合参数与土性相关。

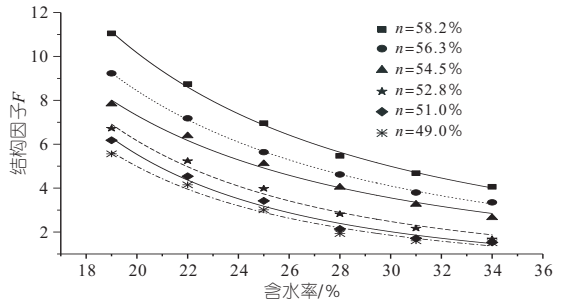


图 6 含水率与结构因子 F 的关系曲线

Fig. 6 The relationship between water content and structure factor

表 2 红粘土电阻率与含水率的拟合公式

Tab. 2 The fitting formula of laterite resistivity and water content

孔隙率/%	拟合公式	R^2
58.2	$\rho = 130\ 643.95\omega^{-1.75}$	0.998
56.3	$\rho = 118\ 104.10\omega^{-1.78}$	0.999
54.5	$\rho = 101\ 355.66\omega^{-1.78}$	0.992
52.8	$\rho = 346\ 679.13\omega^{-2.25}$	0.985
51.0	$\rho = 653\ 216.74\omega^{-2.49}$	0.986
49.0	$\rho = 496\ 985.00\omega^{-2.44}$	0.984

3.4 孔隙率

选取孔隙率 49.0%、51.0%、52.8%、54.5%、56.3%、58.2% 及孔隙水 5 分析红粘土电阻率与孔隙率关系。不同含水率下红粘土电阻率与孔隙率关系见图 7。由图 7 可知,红粘土电阻率随孔隙率的增加呈幂函数关系增加,当孔隙率较大时,不同含水率下的红粘土电阻率差值较大。原因主要在于孔隙率较大时,粘土颗粒之间接触不紧密,随着孔隙率减小、含水率增大,土体内部形成良好的导电通道,致使电阻率减小。含水率对红粘土电阻率的减小作用体现在孔隙率对电阻率影响上,称作“含水率减小作用”^[8]。

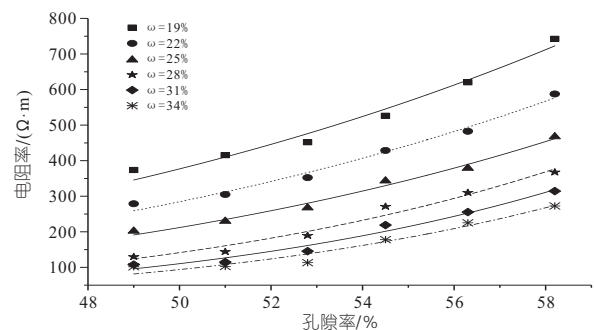


图 7 不同含水率下红粘土电阻率与孔隙率关系

Fig. 7 Relationship between resistivity and porosity of laterite under different water contents

孔隙率与结构因子关系曲线见图 8。由图 8 可知,在不同含水率下,结构因子(F)与孔隙率之间具有较好的拟合关系,呈幂函数关系。表 3 为不同含水率下红粘土电阻率与孔隙率之间的拟合

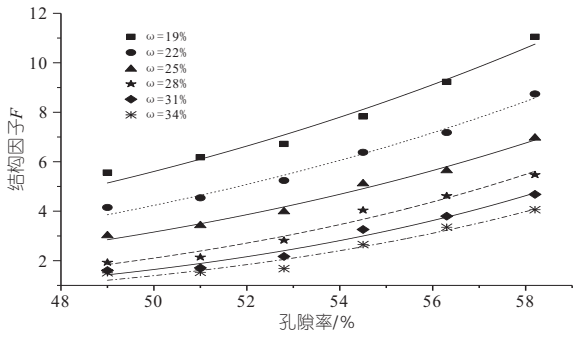


图 8 孔隙率与结构因子(F)关系曲线

Fig. 8 Porosity versus structure factor (F) curve

关系式。建立孔隙率与结构因子之间的关系式为：

$$F = \varphi n^b \quad (5)$$

式中, φ 、 b 均为拟合参数与土性相关。

表 3 红粘土电阻率与孔隙率的关系

Tab. 3 The fitting formula of laterite resistivity and porosity

含水率/%	拟合公式	R^2
19	$\rho = 1.96 \times 10^{-5} n^{4.28}$	0.977
22	$\rho = 3.61 \times 10^{-6} n^{4.67}$	0.987
25	$\rho = 4.14 \times 10^{-7} n^{5.13}$	0.987
28	$\rho = 1.53 \times 10^{-9} n^{6.45}$	0.975
31	$\rho = 1.56 \times 10^{-10} n^{6.98}$	0.975
34	$\rho = 9.59 \times 10^{-11} n^{7.06}$	0.955

3.5 正交试验分析

通过正交试验方法对主要影响因素进行敏感性分析,找出各因素对试验结果影响的主次。本次试验采用三因素三水平 $L_9(3^3)$ 正交试验,以红粘土电阻率为指标,选取孔隙水、含水率及孔隙率为影响因素进行分析,正交试验结果见表 4。表 4 中方差(R)直接反映了不同因素对红粘土电阻率的影响程度,方差越大说明红粘土电阻率在该因素下波动范围越大,则该因素对红粘土电阻率的影响程度也就越大。由表 4 可知,红粘土电阻率受孔隙水的影响最大,其次为含水率,孔隙率的影响

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Results of orthogonal test

试验编号	因素 A (孔隙水)	因素 B (含水率/%)	因素 C (孔隙率/%)	电阻率 /($\Omega \cdot m$)
1	1(白开水)	1(19)	1(58.2)	49 386.1
2	1(白开水)	2(28)	3(49.0)	9 393.8
3	1(白开水)	3(34)	2(54.5)	10 522.2
4	2(雨水)	1(19)	3(49.0)	1 216.8
5	2(雨水)	2(28)	2(54.5)	769.2
6	2(雨水)	3(34)	1(58.2)	724.8
7	3(自来水)	1(19)	2(54.5)	526.1
8	3(自来水)	2(28)	1(58.2)	367.5
9	3(自来水)	3(34)	3(49.0)	101.8
极差 K_1	69 302.1	51 129.0	50 478.4	
极差 K_2	2 710.8	10 530.5	11 817.5	
极差 K_3	995.4	11 348.8	10 712.4	
方差 R	22 768.9	13 532.8	13 255.3	A>B>C

响为三者中最小。不同影响因素的正交试验结果对比见图 9。由图 9 可知,红粘土电阻率影响程度依次为孔隙水>含水率>孔隙率。

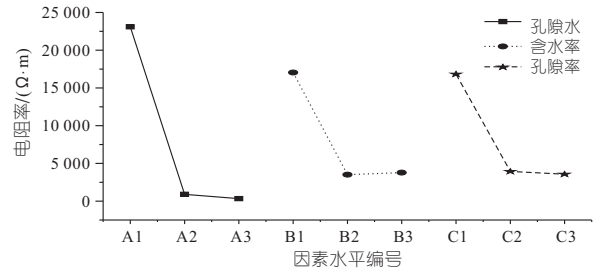


图 9 不同影响因素的正交试验结果对比

Fig. 9 Comparison of orthogonal test results of different influencing factors

4 红粘土电阻率预测模型

4.1 红粘土电阻率预测模型

由孔隙水、含水率及孔隙率不同情况下的红粘土电阻率与结构因子的相关性可知,其变化趋势基本呈幂函数关系。为进一步拓展电阻率法在红粘土中的应用范围,利用曲面函数 $z = ax^b y^c$ 对含水率 19%、22%、25%、28%、31%、34% 和孔隙率 49.0%、51.0%、52.8%、54.5%、56.3%、58.2% 合计 36 组试验数据进行拟合分析。结构因子与含水率和孔隙率的关系见图 10。由图 10

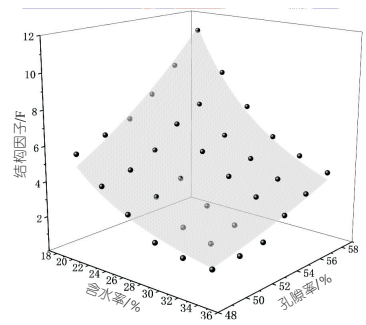


图 10 结构因子与含水率和孔隙率的关系

Fig. 10 Relationship between structure factor and water content and porosity

可知,含水率和孔隙率与结构因子之间相关性较好,拟合结果精度较高,相关系数 $R^2 = 0.979$,拟合公式为:

$$F = 1.24 \times 10^{-5} \omega^{-1.93} n^{4.8} \quad R^2 = 0.979 \quad (6)$$

根据结构因子的定义和接触电阻的修正公式(式(2)),再结合式(6)可得出红粘土关于孔隙水、含水率及孔隙率的电阻率预测模型为:

$$\rho = 1.24 \times 10^{-5} \omega^{-1.93} n^{4.8} \rho_w - \rho' \quad (7)$$

4.2 模型验证

为验证红粘土电阻率预测模型的合理性,选取 3 种孔隙水、5 个含水率、4 个孔隙率共 60 组试验数据,将土物性参数代入红粘土电阻率预测

模型求得计算值,并与相应条件下的红粘土电阻率实测值进行对比分析,结果见表 5。土体电阻率试验值与计算值误差控制在 $\pm 15\%$ 以内属于可接受范围^[9]。由表 5 可知,预测值与实测值之间整体误差在 $\pm 13\%$ 以内,平均误差为 $\pm 7.4\%$,证明红粘土电阻率预测模型的合理性。

表 5 红粘土电阻率预测值与实测值误差对比分析

Tab. 5 Error analysis of predicted and measured laterite resistivity values

孔隙水	孔隙率 $n/\%$	含水率 $\omega/\%$				
		19	22	25	28	34
孔隙水 5	58.2	9.96	4.45	7.37	-8.05	5.64
	56.3	-6.61	8.52	5.10	-3.96	3.33
	52.8	7.33	-6.67	-10.30	4.34	7.22
	49.0	10.13	5.15	-4.32	-2.33	-3.98
孔隙水 4	58.2	11.74	4.40	-1.46	8.87	-3.27
	56.3	5.28	7.45	-8.76	7.11	2.61
	52.8	7.03	-8.78	-5.54	-6.42	-5.69
	49.0	-7.94	6.01	-4.81	-7.89	-3.77
孔隙水 1	58.2	-12.39	11.54	10.76	-9.19	-11.04
	56.3	9.70	12.12	11.47	12.00	9.98
	52.8	-10.42	11.32	12.68	-5.76	8.72
	49.0	-9.73	7.33	7.08	-6.14	-7.70

5 结论

a. 考虑到电极面积对实测电阻值的影响,建立了红粘土接触电阻率修正公式,以含水率和孔隙率为变量;将 5 种孔隙水分别作为红粘土孔隙水测试相应电阻率,结果表明结构因子 F 能够较为准确地推算出饱和红粘土电阻率。

b. 红粘土电阻率随着含水率的增加呈幂函数减小,随着孔隙率的增加呈幂函数增加,结构因子能够有效反映红粘土含水率与孔隙率的变化情况,呈现出较好的相关性,电阻率可作为红粘土结构特性研究参考指标。

c. 正交试验对比分析了主要因素对红粘土电阻率影响的大小关系为孔隙水 $>$ 含水率 $>$ 孔隙

率,并构建了红粘土电阻率预测模型,通过实测值与预测值误差分析,可知模型精度较高,能为红粘土物理指标及结构分析研究提供便捷手段。

参考文献:

- [1] 于小军,刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):393-396.
- [2] AZHAR A T S, AYUNI S A, EZREE A M, et al. The use of electrical resistivity method to mapping the migration of heavy metals by electrokinetic[J]. Iop conference series: Materials science and engineering, 2017, 226: 012062.
- [3] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the American institute of mining and metallurgical engineers, 1942, 146(1): 54-62.
- [4] TUMIDAJSKI P J, SCHUMACHER A S, PERRON S, et al. On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems[J]. Cement and concrete research, 1996, 26(4): 539-544.
- [5] 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.
- [6] 查甫生,刘松玉,杜延军,等. 击实黄土的电阻率特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 155-158, 165.
- [7] MOSLEH A T, AL-OBAIDY N K. A critical review on expansive soils including the influence of hydrocarbon pollution and the use of electrical resistivity to evaluate their properties[J]. IOP conference series: Materials science and engineering, 2021, 1076: 012097.
- [8] SHAN WEI, LIU YAO, HU ZHAOGUANG, et al. A model for the electrical resistivity of frozen soils and an experimental verification of the model[J]. Cold reg. sci. technol., 2015, 119: 75-83. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2015. 07. 010.
- [9] 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]. 岩土力学, 2020(增刊 2): 1-10. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0137>.

Analysis of Influencing Factors of Laterite Resistivity and Its Prediction Model Construction

CAI Bo¹, XU Xing-qian¹, QU Xin², PENG Guang-can¹, WANG Hai-jun¹, CHEN Xiao-shuang¹

(1. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

Abstract: The resistivity method can reflect the soil physical index and structural properties, and it has the characteristics of high efficiency, convenience and non-destructive. In this study, the resistivity characteristics and the resistivity model of laterite had been analyzed using the pore water, water content and porosity as the key factors. A correction formula of contact resistance was proposed considering the influence of electrode area, and the resistivity prediction model of laterite had been established by introducing the structural factors to reflect the influence of pore water on the resistivity of laterite. The results show that the proposed contact resistivity correction formula can effectively reduce the test error, the laterite resistivity and structure factors decrease with the increasing water content and porosity with a power function relationship. The correlation of influencing factors of laterite resistivity is sorted as: pore water $>$ water content $>$ porosity. The resistivity prediction model of laterite was constructed with the variables of contact resistance, pore water, water content and porosity, which has high fitting accuracy. Thus, it can provide a reference for evaluating the physical indicators and structural properties of laterite.

Key words: red clay; resistivity model; pore water; influencing factors