NaOH污染下水泥土的电阻率变化研究

董晓强，白晓红，赵永强，韩鹏举
（太原理工大学建筑与土木工程学院，山西 太原 030024）

摘 要：通过室内浸泡试验模拟了不同龄期的水泥土试块受不同浓度NaOH溶液的污染，采用电阻率法研究了电阻率与各参数之间的关系。结果表明，水泥土和孔隙水电阻率随溶液浓度增大而减小，随龄期的增大而增大；结构因子随溶液浓度增大而增大，随龄期的增大而减小。然后通过对水泥土无侧限抗压强度试验结果的分析，得到了强度与水泥土电阻率的关系式，它们具有较好的线性相关性。在此基础上推导出预测任意溶液浓度和龄期的水泥土电阻率公式，经对比预测值与实测值，证明它们比较接近，说明公式的准确性较高。研究认为：水泥土的电阻率特性与污染程度和抗压强度密切相关，可以用来反应污染程度和抗压强度。

关键词：水泥土；电阻率；结构因子；龄期；无侧限抗压强度；NaOH污染
中图分类号：TU411.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1715－05

作者简介：董晓强(1974－)，男，山西太原人，博士研究生，主要从事岩土工程等方面的研究。E-mail: dongxiaoqiang@126.com。

Study on electrical resistivity of soil-cement polluted by NaOH

DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, HAN Peng-ju
(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Through the lab tests on soil-cement blocks polluted by various concentrations of NaOH solution, the relations between electrical resistivity and various parameters were studied. It was indicated that the electrical resistivity and formation factor were closely correlated with solution concentrations and age time. Then a strength equation related with the electrical resistivity of soil-cement was obtained by analyzing the results of unconfined compression strength test. The equation indicated that the unconfined compression strength was in proportion to its electrical resistivity. Finally a forecast formula was set up to indicate the relationship of electrical resistivity with solution concentration and age time. The predicted and measured values were close so that the accuracy of the formula was rather high. A conclusion was drawn that the electrical resistivity of soil-cement was closely related with its pollution degree and unconfined compression strength, so the electrical resistivity might be taken as an effective means to appraise the pollution degree and unconfined compression strength of soil-cement in practical engineering projects.

Key words: soil-cement; electrical resistivity; formation factor; age time; unconfined compression strength; pollution by NaOH

0 引 言

水泥土搅拌桩是以水泥作为固化剂，通过深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体的地基处理方法[1]。由于其性能良好，价格低廉，施工方便，被广泛的应用于工程中。随着化工工业的发展，各种工业废液的排放直接导致地下水具有腐蚀性，这对水泥土搅拌桩的力学性质和耐久性产生了重要影响[2-4]。但目前国内还没有专门用于污染土的勘察设备和分析、试验仪器，只能应用岩土工程勘察中的通用手段，如钻探、井探、物探、各种原位测试、室内土工试验等。虽然近年来国内也出现了一些特殊的测试技术，如煮沸酸液试验、CT测试技术，但操作复杂，成本较高。因此，在一定程度上制约了对污染土的研究。

电阻率法作为一种方便、无损、低廉的方法已被人们应用于岩土工程的研究中。刘国华等[5]研究了土的电阻率特性，建立了地区性的黏土电阻率模型。于小军等[6]研究了水泥土电阻率变化规律，建立了水泥土电阻率模型。魏小胜等[7-8]采用电阻率法研究了水泥水化过程，建立了不同水灰比水泥浆基体的电阻率随时间变化的特征曲线。在国外，Gil Lim Yoon等[9]研

基金项目：山西省留学回国人员科研资助项目（2006-26）
收稿日期：2006－10－17

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究了工业污染对砂土电阻率的影响。在国内，韩立华、刘松玉等[10]利用电阻率法进行了室内模拟污染土的检测，证明该方法是行之有效的。至此，电阻率法应用于环境岩土工程的研究得到重视。本文研究了不同龄期和不同浓度 NaOH 溶液浸泡水泥土的电阻率特性，揭示了电阻率参数同溶液浓度、龄期、强度之间的关系，并推导了水泥土电阻率预测公式。

1 电阻率测试原理及方法

1.1 测试原理

土的电阻率是表征土体导电性的基本参数,是土的固有物性参数之一。土的电阻率实际上就是当电流垂直通过边长为 1 m 的立方体土时所呈现的电阻大小,单位为Ω·m，与电导率成倒数。综合而言，土的电阻率由土颗粒的电阻率和孔隙水的电阻率组成[10]。根据土的电阻率特性，采用由笔者自行研制的电阻率自动测试仪，其测试部分基本原理如图 1 所示。电源采用交流、低频 50 Hz。A，V 分别为高精度数字电流表和电压表，R_X 为待测水泥土试块。

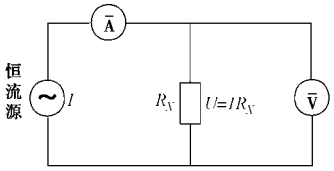


图 1 基本电路图

Fig. 1 The basic circuit

仪器采用交流恒流通过试块,测得试块两端电压,按照以下公式[11]进行运算，得出平均电阻率值

$$\overline{\rho_X}=\frac{\overline{R_X}S}{L}=\frac{\overline{U}}{I}\frac{S}{L} \quad 。 \tag{1}$$

式中 $\overline{\rho_X}$ 为水泥土的平均电阻率；$\overline{R_X}$ 为水泥土的平均电阻；$\overline{U}$ 为水泥土的电压值；I 为交流恒流值，本试验取 I=1 mA；S 为电极横截面积；L 为电极片间距。

1.2 对温度的修正

温度对电阻率有很大的影响。温度升高导致离子活动性上升，从而电阻率下降。为方便对数据进行互相比较，对温度均校正至 25℃。研究表明，电阻率与温度有如下关系[12]：

$$\rho_{25}=\rho_T[1+\alpha(T-25)] \quad 。 \tag{2}$$

式中 T 为测量时的温度(℃)；ρ_T 为 T℃时的电阻率；ρ_{25} 为 25℃时的电阻率；α 为温度系数，测水泥土和孔隙水时均取 0.02/℃。

1.3 对温度的修正

金属电极与试块接触处的电阻要发生显著变化，为减小试验误差，必须进行接触电阻的修正。可以依次测出不同长度的试样间的电阻，作出 $R-L$ 的直线拟合曲线（图 2），延长直线与 R 轴相交，得到的截距即为接触电阻。本次试验的接触电阻 R_0=1.35 Ω。实测电阻值 R 与接触电阻 R_0 的差值即为试样电阻值。

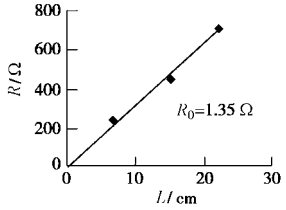


图 2 *R-L* 的直线拟合曲线

Fig. 2 *R-L* fitting linear curve

2 试验过程

2.1 试块制作

本次试验水泥土中使用的土为粉土，取自太原长风大街某工地，塑性指数为 7.1；水泥使用太原狮头水泥公司生产的普通硅酸盐水泥 32.5#。水泥土试块配比使用的土为风干粉土，将风干土、水泥、水按比例（干土：水泥：水=1：0.15：0.58）放入 60 kg 的小型搅拌机内充分搅拌后，用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 规格的试模，采用手工压注成型，静置 24 h 后脱模编号，送到养护箱中。标准养护 7 d 后将试块浸泡在预先配制好的 NaOH 溶液中，浓度分别为 1.5，4.5，9，18，22.5 g/L，溶液浓度的选取参照了《岩土工程勘察规范》（GB50021—2001）。

2.2 试验过程

在 NaOH 溶液中分别浸泡 1d，3d，7d，14d，28d 后，取出试块，自然晾至表面无水膜，接触面绝对不能有油等绝缘物，表面应平整，喷涂一层石墨，然后通过铝箔与电极板夹紧，保证接触紧密，依次对每个试块测电阻率，然后测试溶液（即孔隙水）电阻率，最后进行无侧限抗压强度试验。

3 试验结果及分析

3.1 试块外观变化

通过观察发现，经过 NaOH 溶液浸泡后的试块，随着龄期及溶液浓度的增长表观变化不明显。为节省篇幅,本文只列出浸泡前和浸泡 28 d 各个浓度下照片，见图 3 所示。

3.2 基本参数间的相互关系

水泥土电阻率及各参数计算结果汇总于表 1，有关参数的相互关系绘成图 4。可知：①水泥土电阻率 ρ_s 随着龄期的增加而增加，随着溶液浓度的增加而降

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

低；②孔隙水电阻率ρ_w随着龄期的增加而增加，随着溶液浓度的增加而降低；③结构因子 F 为ρ_s/ρ_w，无量刚。它随着龄期的增加而降低，随着溶液浓度的增加而增加，这说明ρ_w对溶液浓度的敏感程度远大于ρ_s对溶液浓度的敏感程度。

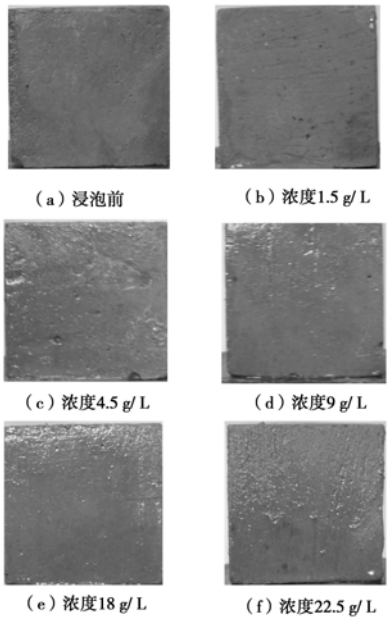


图 3 试块表面照片（28 d）

Fig. 3 Photos of sample surface (28 d)

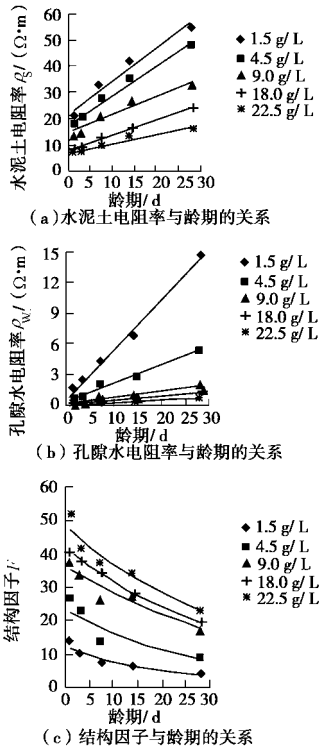


图 4 基本参数相互关系

Fig. 4 Relationship among various parameters

表 1 水泥土的试验结果

Table 1 Experimental results of soil-cement

龄期/d	参数	浓度/(g·L^{-1}) 1.5	4.5	9.0	18	22.5
1	ρ_s	20.93	17.80	14.31	7.96	6.71
	ρ_w	1.56	0.68	0.38	0.19	0.13
	F	13.42	26.27	37.70	40.10	51.61
3	ρ_s	24.09	21.07	15.20	9.51	7.49
	ρ_w	2.38	0.92	0.45	0.25	0.18
	F	10.12	22.90	33.78	38.04	41.61
7	ρ_s	32.85	28.09	21.40	13.04	10.13
	ρ_w	4.21	2.05	0.82	0.38	0.27
	F	7.80	13.70	26.10	34.32	37.52
14	ρ_s	41.98	35.81	27.41	16.05	13.06
	ρ_w	6.67	2.65	0.99	0.57	0.39
	F	6.29	13.52	27.68	28.16	33.49
28	ρ_s	55.30	48.43	32.95	24.03	16.12
	ρ_w	14.58	5.42	1.85	1.23	0.69
	F	3.79	8.94	17.81	19.54	23.36

注：ρ_s，ρ_w单位均为(Ω·m)。

3.3　NaOH 浸泡下水泥土电阻率与强度的关系

通过对以上水泥土试块进行无侧限抗压强度试验，得到了水泥土电阻率与抗压强度的关系，见图 5。

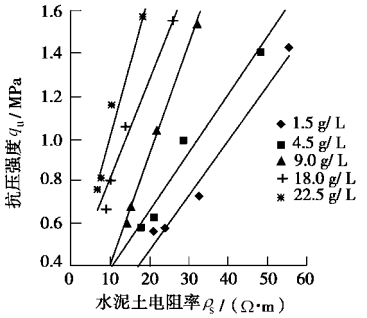


图 5 抗压强度与水泥土电阻率的关系

Fig. 5 Relationship between electrical resistivity and compression strength

各浓度的水泥土强度与电阻率关系式为

浓度 1.5 g/L：

$$q_u=0.0259\rho_s-0.0382,\ R^2=0.978; \quad (3a)$$

浓度 4.5 g/L：

$$q_u=0.0274\rho_s+0.1135,\ R^2=0.958; \quad (3b)$$

浓度 9.0 g/L：

$$q_u=0.0483\rho_s-0.0508,\ R^2=0.991; \quad (3c)$$

浓度 18 g/L：

$$q_u=0.0526\rho_s+0.2939,\ R^2=0.982; \quad (3d)$$

浓度 22.5 g/L：

$$q_u=0.0833\rho_s+0.2244,\ R^2=0.971。 \quad (3e)$$

可见水泥土电阻率与无侧限抗压强度有较好的线性相关性：①在相同的溶液浓度下，强度随着电阻率的增大而增大；②在相同电阻率下，溶液浓度越高，抗压强度也越高；③直线斜率随着溶液浓度的增加而

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 电阻率预测值与实测值

Table 2 Predicted and measured values

浓度/(g·L^{-1})	3 d			7 d			14 d			28 d		
	预测值	实测值	误差/%	预测值	实测值	误差/%	预测值	实测值	误差/%	预测值	实测值	误差/%
1.5	22.80	24.09	−5.0	34.16	32.85	4.0	43.46	41.98	3.5	52.76	55.30	−4.6
4.5	19.39	21.07	−7.9	29.06	28.09	3.4	36.96	35.81	3.2	44.87	48.43	−7.3
9.0	15.59	15.20	2.5	23.36	21.40	9.2	29.72	27.41	8.4	36.07	32.95	9.5
18.0	8.67	9.51	−8.8	12.99	13.04	−0.4	16.53	16.05	3.0	20.07	24.03	−15.5
22.5	7.31	7.49	−2.4	10.95	10.13	8.1	13.93	13.06	6.7	16.92	16.12	4.9

注：预测值和实测值单位均为（Ω·m）。

增加，表明在相同的电阻率增量下，溶液浓度越高，强度增量越大。因此，可以通过测试水泥土电阻率来反映其抗压强度。

3.4 预测公式的推导

水泥土电阻率与 NaOH 溶液浓度的关系见图 6。由图 6 可知，水泥土电阻率均随着浓度的增加呈指数下降，各龄期电阻率与浓度的关系式为

龄期 1 d：

$$\rho_s = 22.938e^{-0.056x},\ R^2 = 0.9643; \quad (4a)$$

龄期 3 d：

$$\rho_s = 26.261e^{-0.056x},\ R^2 = 0.9641; \quad (4b)$$

龄期 7 d：

$$\rho_s = 35.825e^{-0.056x},\ R^2 = 0.9749; \quad (4c)$$

龄期 14 d：

$$\rho_s = 45.753e^{-0.056x},\ R^2 = 0.9865; \quad (4d)$$

龄期 28 d：

$$\rho_s = 59.907e^{-0.056x},\ R^2 = 0.9785。 \quad (4e)$$

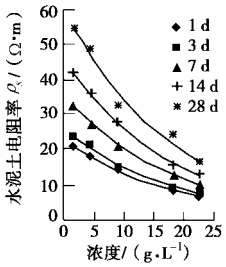


图 6 水泥土电阻率与溶液浓度关系图

Fig. 6 Relationship between electrical resistivity and solution concentration

在水泥土电阻率与强度呈线性关系的基础上[13]，假定水泥土的电阻率与浓度和龄期有如下关系：

$$\frac{\rho_{s(y)_D}}{\rho_{s(x)_1}} = A^{[(x)_1-(y)_D]}(B + C\ln D)\ 。 \quad (5)$$

式中 $\rho_{s(y)_D}$，$\rho_{s(x)_1}$ 分别为龄期 D 和 1d 的水泥土电阻率值；$(x)_1$，$(y)_D$ 分别为龄期 1d 和 D 的 NaOH 溶液浓度（g/L）；A，B，C 为常数；D 为龄期。

联立公式（4a），（4b），（4e），有

$$\frac{\rho_{s(y)_3}}{\rho_{s(x)_1}} = 1.145e^{0.056[(x)_1-(y)_3]}\ , \quad (6)$$

$$\frac{\rho_{s(y)_{28}}}{\rho_{s(x)_1}} = 2.612e^{0.056[(x)_1-(y)_{28}]}\ 。 \quad (7)$$

由公式（5）～（7）联立解得 A，B，C 值分别为 1.058，0.423，0.657。

联立公式（4a），（4c），（4d），有

$$\frac{\rho_{s(y)_7}}{\rho_{s(x)_1}} = 1.562e^{0.056[(x)_1-(y)_7]}\ , \quad (8)$$

$$\frac{\rho_{s(y)_{14}}}{\rho_{s(x)_1}} = 1.995e^{0.056[(x)_1-(y)_{14}]}\ 。 \quad (9)$$

由公式（5），（8），（9）联立解得 A，B，C 值分别为 1.058，0.346，0.625，A，B，C 最后取值分别为：$A = 1.058$，$B = \frac{1}{2}(0.423 + 0.346) = 0.385$，$C = \frac{1}{2}(0.657 + 0.625) = 0.641$，

将式 A，B，C 的值代入式（5）中，即

$$\frac{\rho_{s(y)_D}}{\rho_{s(x)_1}} = 1.058^{[(x)_1-(y)_D]}(0.385 + 0.641\ln D)\ 。 \quad (10)$$

公式（10）即为水泥土的电阻率预测公式，此关系式的预测值和实测值对比见表 2 和图 7。

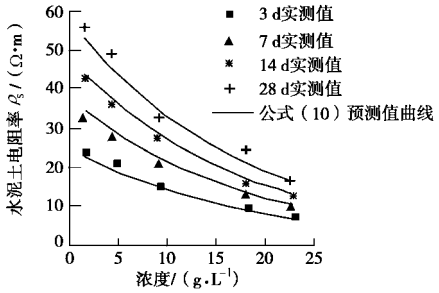


图 7 电阻率实测值与预测值对比图

Fig. 7 Comparison between measured and predicted values

对比图 7 中的实测值和预测值可以发现，它们比较接近，从表 2 可以看出，最小误差为−0.4%，最大误差为−16.5%，其余误差均在 10%以内，说明公式（10）的准确性较高。在测得 1d 的水泥土电阻率后，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以利用式（10）对任意溶液浓度和龄期的水泥土电阻率进行预测，使用非常方便。

4 结　　论

（1）受 NaOH 浸泡的水泥土电阻率、孔隙水电阻率、结构因子与 NaOH 溶液浓度、龄期具有较高的相关性，可通过水泥土电阻率特性来反应其污染程度。

（2）受 NaOH 浸泡的水泥土电阻率与无侧限抗压强度有较好的线性相关性，可以通过测试水泥土电阻率来反应其抗压强度。

（3）建立了受 NaOH 浸泡的水泥土电阻率预测公式，可以利用该公式对任意溶液浓度和龄期的水泥土电阻率进行预测，准确性较高。

参考文献:

[1] JGJ79－2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ79－2002 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Buiding Press, 2002. (in Chinese))

[2] 宁宝宽, 陈四利, 刘　斌, 刘一芳. 环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 599－603. (NING Bao-kuan, CHEN Si-li, LIU Bin, LIU Yi-fang. Experimental study of cemented soil under environmental erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4):599－603. (in Chinese))

[3] 宁宝宽, 陈四利, 刘　斌. 水泥土的环境侵蚀效应与破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(10): 1778－1782. (NING Bao-kuan, CHEN Si-li, Liu Bin. Fracturing behaviors of cemented soil under environments erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(10): 1778－1782. (in Chinese))

[4] 白晓红, 赵永强, 韩鹏举, 乔俊义, 吴植安. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学业报, 2007, **29**(8): 1260－1263. (BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, HAN Peng-ju, QIAO Jun-yi, WU Zhi-an. Experimental study on mechanical property of cemented soil under environmental contami-nations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1260－1263. (in Chinese))

[5] 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 Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 83－87. (in Chinese))

[6] 于小军. 电阻率结构模型理论的土力学应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2004: 47. (YU Xiao-jun. On the theory and application of electrical resistivity model in soil mechanics[D]. Nanjing: Southeast University, 2004: 47. (in Chinese))

[7] 魏小胜, 肖莲珍, 李宗津. 采用电阻率法研究水泥水化过程[J]. 硅酸盐学报, 2004, **32**(1): 34－38. (WEI Xiao-sheng, XIAO Lian-zhen, LI Zong-jin. Study on hydration of Portland cement using an electrical resistivity method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, **32**(1): 34－38. (in Chinese))

[8] WEI X, LI Z. Study on hydration of portland cement with fly ash using electrical measurement[J]. Materials and Structures, 2005, **38**(4): 411－417.

[9] GIL Lim Yoon, JUN Boum Park. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils[J]. Journal of Hazardous Materials , 2001(B84): 147－161.

[10] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 1028－1032. (HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. New method for testing contaminated soil—electrical resistivity method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 1028－1032. (in Chinese))

[11] 刘松玉, 查甫生, 于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, **14(**2): 216－221. (LIU Song-yu, ZHA Fu-sheng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, **14(**2): 216－221. (in Chinese))

[12] CAMPBELL R B, BOWER C A, RICHARD L A. Change in electrical conductivity with temperature and the relation with osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1948, **13**: 33－69.

[13] 刘松玉, 韩立华, 杜延军. 水泥土的电阻率特性及应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1921－1926. (LIU Song-yu**,** HAN Li-hua, DU Yan-jun. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1921－1926. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net