

Cu(Ⅱ)对重塑黄土抗剪强度和电阻率的影响

杨波 李熠 董晓强*

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 太原 030024)

摘要 为研究 Cu^{2+} 含量不同对重塑土的抗剪强度影响以及剪切过程中电阻率变化,进行了室内直剪试验。制取含量为 0 mg/kg、5 mg/kg、50 mg/kg、500 mg/kg、5 000 mg/kg 的五种 Cu^{2+} 污染重塑土,对其进行直剪试验和电阻率试验,最后处理并分析数据。结果表明:随 Cu^{2+} 含量增加,电阻率减小,且电阻率浮动变小,电阻率随剪切位移增大呈减小的趋势,含量 500 mg/kg 时的电阻率浮动小,规律明显; Cu^{2+} 污染土剪应力随剪切位移增大不断增加,没有明显的屈服点; Cu^{2+} 含量小于 5 mg/kg 时, Cu^{2+} 污染土抗剪强度随 Cu^{2+} 含量增加而增加, Cu^{2+} 含量大于 500 mg/kg 时, Cu^{2+} 污染土抗剪强度随 Cu^{2+} 含量增加而减小;同一含量下的污染土在不同垂直压力下的抗剪强度与电阻率呈负相关, Cu^{2+} 含量越大抗剪强度变化对电阻率越不敏感;定义了电阻率角、初始电阻率,电阻率角反映电阻率对土体结构变化的敏感程度,初始电阻率为土体在没有垂直压力作用下时的电阻率。

关键词 Cu^{2+} 重塑黄土 抗剪强度 电阻率

中图分类号 TU 411.7; **文献标志码** A

我国经济快速发展的同时也给环境带来了巨大的污染,其中的土壤污染^[1]又是关乎人们身心健康和实际工程安全的重中之重,重金属污染是土壤污染中常见的类型,对农作物^[2]、土体性质^[3-6]都有非常大的影响,饶卫国等^[7]研究了重金属污染对土的压实特性与抗剪强度的影响规律,程峰等^[8]研究了不同重金属污染量对土体工程性能的影响,这些都为重金属污染土的研究起到一定的促进作用。

电阻率法由于其具有原位、方便、快捷、无损等特点,逐渐被引入到污染土的研究中来^[9-11],现结合电阻率法研究不同 Cu^{2+} 含量对土的抗剪强度以及其参数的影响,试验测试 Cu^{2+} 污染重塑土剪切过程中的电阻率变化,分析抗剪强度、电阻率和含量三者之间的相互关系,同时根据土的粘聚力、内摩擦角定义了电阻率的电阻率角和初始电阻率,提出适当离子含量可以用于土体破坏的监测,为工程实际提供了参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所取用黄土来自太原市东山的某工地,取土的深度为 5 m,该原状黄土基本性质列于表 1。

试验所用重金属污染物为三水硝酸铜,分子式为 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,为深蓝色柱状结晶,溶液呈弱酸性,低毒,不可食用,试验用水为蒸馏水。

1.2 试样制备

Cu^{2+} 污染重塑土:

取适量原状黄土,碾碎,放于温度为 105 ℃ 的烘箱中,充分烘干,取出,过 2 mm 筛,控制重塑土干密度、含水率与原状黄土相同,分别制取 Cu^{2+} 含量为 0 mg/kg、5 mg/kg、50 mg/kg、500 mg/kg、5 000 mg/kg 的 Cu^{2+} 污染重塑土,取相应质量的土、水、重铬酸钾,首先将污染物溶入水中,之后将土和水充分搅拌均匀并闷放 24 h,用压样法制重塑土土样。试验方案如表 2 所示,以下将污染重塑土简称为污染土。

表 2 试验方案

Table 2 Plan of the test

Cu^{2+} 含量/(mg · kg ⁻¹)	0	5	50	500	5 000
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ /mg	0	14	141	1 413	14 135

每个试样分别有四个平行试样,共制取 Cu^{2+} 污染土样 20 块,分别用保鲜膜密封,置于养护箱中恒温恒湿养护 3 d,之后取出进行试验。

1.3 试验方法

将养护 3 d 之后的试样取出,进行直剪试验,所用的环刀型号为 D61.8 mm × H20 mm,采用应变控

2015 年 6 月 18 日收到 国家自然科学基金(51178287);
山西省回国留学人员科研项目(2013-043)
和山西省留学回国人员科技活动择优项目资助
第一作者简介:杨波(1988—),硕士研究生。研究方向:环境岩土。

* 通信作者简介:董晓强(1974—),男,山西霍州人,副教授,博士生导师,博士。E-mail: dongxiaoliang@126.com。

制式四联电动直剪仪,剪切速率为 0.8 mm/min,设置四个不同的垂直压力进行固结快剪试验^[12],垂直压力分别为 $\sigma_1 = 50$ kPa、 $\sigma_2 = 100$ kPa、 $\sigma_3 = 200$ kPa、 $\sigma_4 = 300$ kPa,同时在剪切过程中进行电阻率的实时监测,如图 1,对剪切过程进行录像,最后收集并整理数据,对结果进行分析。

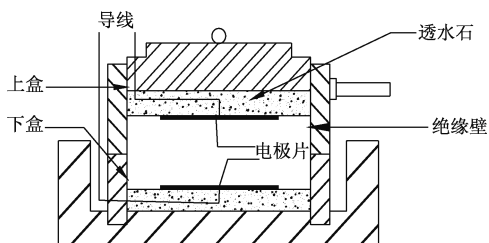


图 1 改装的直剪仪示意图

Fig. 1 The picture of a modified shear test equipment

采用 TH2828 型号的 LCR 数字电桥进行电阻率测试,电流频率设置为 50 Hz,测得电阻值 R ,然后根据式(1)计算得电阻率

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

式(1)中 ρ 为土样的电阻率($\Omega \cdot m$)、 R 为土样的电阻值(Ω)、 A 为电极片的面积(m^2)、 H 为两电极片间的距离(m),将重塑土样的电阻值换算为电阻率,进一步对重塑土电阻率进行分析研究。

2 试验结果及分析

2.1 直剪过程中电阻率与剪应力的变化

Cu^{2+} 污染土电阻率与剪切位移的关系曲线如图 2 所示,由于各垂直压力下的电阻率变化规律相似,取垂直压力 $p = 200$ kPa 作为代表进行分析,由图可知,随污染含量的逐级增加,电阻率不断减小,电阻率随剪切位移的增加呈减小的趋势,最后趋于平稳,污染含量越大,电阻率随位移的变化越稳定,但减小的趋势变得不那么明显。这一现象的原因是 Cu^{2+} 含量的不断增加导致的, Cu^{2+} 的加入增加了土体的导电性,使得电阻率减小,同时也是由于 Cu^{2+} 的逐渐增加,减小了电阻率对土体结构变化的反映情况。各污染含量下的剪应力、位移关系曲线相似,且由图 3 可知,含量 500 mg/kg 时的电阻率浮动小,规律明显,所以取 Cu^{2+} 含量 500 mg/kg 作为分析对象,污染土剪应力与剪切位移的变化关系曲线如图 3 所示,由图可知随位移发生,剪应力没有明显的屈服点,是处于不断增大的过程中,按照《土工试验标准》,取 6 mm 处时剪应力作为土体的抗剪强度。造成土体剪应力不断增加的原因可能是污染物与土体发生络合反应,使得土体发生粘聚现象,土体孔隙增加,在剪切过程中剪切面处的土体不断挤密,使得强

度不断增加,导致剪应力的不断增加。

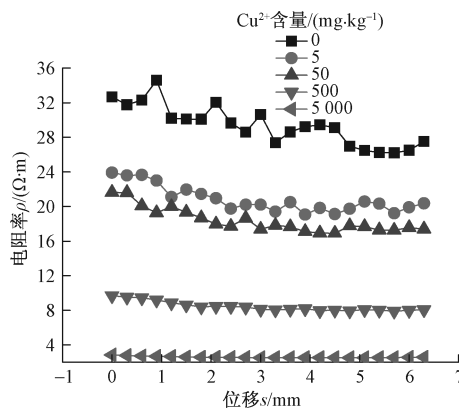


图 2 Cu^{2+} 污染土电阻率与剪切位移关系曲线

Fig. 2 The ρ -s curves of remolded loess contaminated by Cu^{2+}

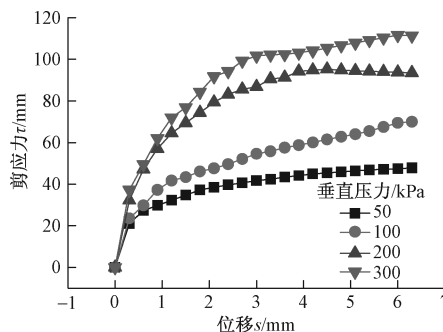
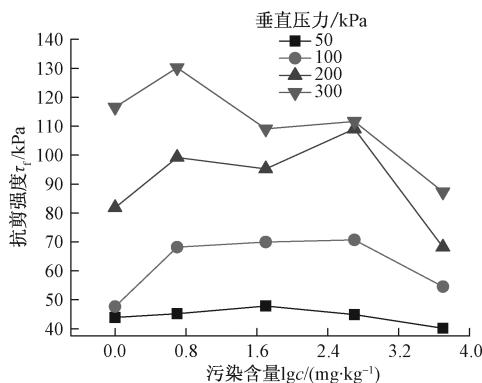
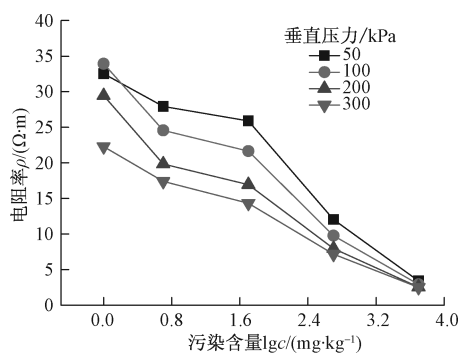
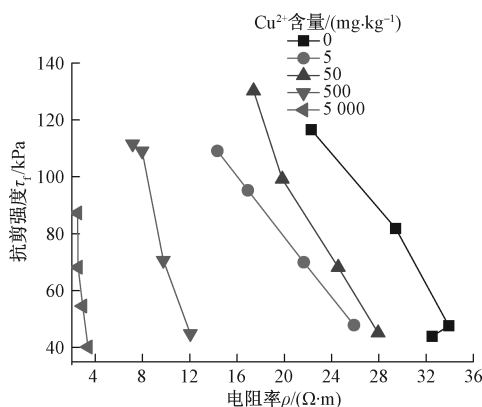


图 3 Cu^{2+} 污染土剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 3 The τ -s curves of remolded loess contaminated by Cu^{2+}

2.2 Cu^{2+} 含量不同对污染重塑土的强度、电阻率影响

Cu^{2+} 污染土抗剪强度、电阻率随含量增加的变化关系曲线如图 4、图 5 所示,由于含量设置为 0 mg/kg、5 mg/kg、50 mg/kg、500 mg/kg、5 000 mg/kg,为便于分析对横轴取常用指数,由图 4 可知,随 Cu^{2+} 含量增加(< 5 mg/kg),污染土的抗剪强度先增加,当 Cu^{2+} 在 5 ~ 500 mg/kg 之间时,随压强不同,抗剪强度有增有减,当污染含量大于 500 mg/kg 时, Cu^{2+} 污染土抗剪强度开始减小。这一现象的原因是 Cu^{2+} 污染物的少量加入增加了土体中的离子量,并被吸附于土体之上,使土粒之间引力变大,但随污染含量不断增加, Cu^{2+} 污染物的腐蚀性能、土颗粒之间的粘聚、溶蚀现象对土体结构起到破坏作用,其破坏力逐渐显现,所以会出现抗剪强度先增加之后波动,最后逐渐减小的趋势。由图 5 可知,随 Cu^{2+} 含量增大,电阻率呈不断减小的趋势,最终趋于 0 ~ $3\Omega \cdot m$ 范围以内,并且含量大于 5 000 mg/kg 时,电阻率随垂直压力的变化几乎不变。这是因为由于污染物正负离子的加入,增加了土体的导电性,随含量增加,导电性越好,且逐渐占据主导地位,所以当离子含量过大时,土体的结构变化对电阻率影响变的微小。

图4 Cu^{2+} 污染土抗剪强度与含量关系曲线Fig. 4 The τ_f -lgc curves of remolded loess contaminated by Cu^{2+} 图5 Cu^{2+} 污染土电阻率与含量关系曲线Fig. 5 The ρ -lgc curves of remolded loess contaminated by Cu^{2+} 图6 Cu^{2+} 污染土抗剪强度与电阻率关系曲线Fig. 6 The τ_f - ρ curves of remolded loess contaminated by Cu^{2+}

据图4和图5中抗剪强度、电阻率随含量变化的关系曲线作抗剪强度与电阻率的关系曲线,如图6所示,探寻不同 Cu^{2+} 含量下抗剪强度与电阻率的关系。据图可得,同一含量下的污染土在不同垂直压力下的抗剪强度与电阻率呈负相关,电阻率变大抗剪强度迅速减小; Cu^{2+} 含量越大曲线斜率越大,这说明抗剪强度对电阻率越不敏感,含量增大,抗剪强度会减小。这是由于垂直压力增大,土体变密实,增加了离子的导电路径与有效导电离子量,所以抗

剪强度增加,电阻率减小;离子含量过大,在土体导电性能中起到主导作用,会导致电阻率对土体结构变化反映不明显,所以对于土体的监测不宜选用离子含量太大的值,结合2.1节可知,一般取500 mg/kg左右,即可以明显的反映土体的变化,又有明显的规律性。

2.3 抗剪强度参数 c 、 φ 变化以及与电阻率参数的定义

表3为 Cu^{2+} 污染土直剪试验结果汇总,据表中不同压强下的抗剪强度可绘图7得黏聚力与内摩擦角,同时根据此原理,取土体破坏时电阻率值,即取抗剪强度值时所对应的电阻率值,对其作电阻率与不同垂直压力的变化关系图,如图8所示。由图7和图8可知,电阻率、抗剪强度随垂直压力的变化关系正好相反,即随垂直压力增大, Cu^{2+} 污染土的抗剪强度增大,电阻率减小,这是因为垂直压力使得土体变密实,强度增加,导电路径、有效导电离子增多。表3中电阻率变化范围为同一土体在不同垂直压力作用下的电阻率变化范围,可知,当含量大于50 mg/kg时,50 mg/kg、500 mg/kg、5000 mg/kg所对应的电阻率变化范围分别为14~30 $\Omega\cdot\text{m}$ 、7~13 $\Omega\cdot\text{m}$ 、2.4~4 $\Omega\cdot\text{m}$,随含量增加电阻率值没有交集,不同的范围反映不同的污染含量,总之,随含量污染含量增加,土体电阻率减小,这可以用于土体污染程度的监测。

根据黏聚力与内摩擦角概念,定义电阻率直线与纵轴交点为初始电阻率,与横轴所成角度为电阻率角,初始电阻率为土体在没有垂直压力作用下时的电阻率,电阻率角反映电阻率对土体结构变化的敏感程度。将 Cu^{2+} 污染土的内摩擦角、电阻率角随含量变化的关系作图9,黏聚力、初始电阻率随含量变化的关系作图10,由图9和图10可知,随含量增加, Cu^{2+} 污染土的电阻率角、初始电阻率都是逐渐减小的,这是因为随离子含量增加土体电阻率减小,离子的导电性在土体中起到主要作用,对土体结构变化不敏感,所以电阻率角、初始电阻率都减小。由图9可知,当含量小于50 mg/kg时,内摩擦角、电阻率角皆随含量增加而减小,这是因为 Cu^{2+} 的加入使颗粒发生黏聚现象,孔隙增大,所以内摩擦角减小。由图10可知,当离子含量大于50 mg/kg时,黏聚力、初始电阻率值都随含量增加而减小,同样是因为污染离子不断加入,污染物对土体的破坏作用逐渐显现,离子交换、双电层厚度发生变化,使得颗粒间斥力大于引力,加之颗粒之间胶结物的溶解、溶蚀等作用,使得土颗粒之间的黏聚力减小。由此可得, Cu^{2+} 含量小于50 mg/kg时,内摩擦角与电阻率角随含量增加而减小, Cu^{2+} 含量大于50 mg/kg时,黏聚力与初始电阻率随含量增加而减小。

表 3 直剪试验结果汇总
Table 3 The results of direct shear tests

试样编号	Cu 含量/ (mg · kg ⁻¹)	$\rho_d/(g \cdot cm^3)$	c_t/kPa	$\varphi/(^\circ)$	电阻率变化范围/ ($\Omega \cdot m$)	抗剪强度 τ_t/kPa			
						σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
C1	0	1.39	24.779	16.6	21 ~ 36	43.90	47.62	81.84	116.56
C2	5	1.39	39.062	14.3	16 ~ 33	45.14	68.20	99.20	109.12
C3	50	1.39	40.790	14.0	14 ~ 30	47.86	69.94	95.23	111.60
C4	500	1.39	33.518	18.8	7 ~ 13	44.89	70.68	109.12	130.20
C5	5000	1.39	33.337	10.2	2.4 ~ 4	40.18	54.56	68.20	87.30

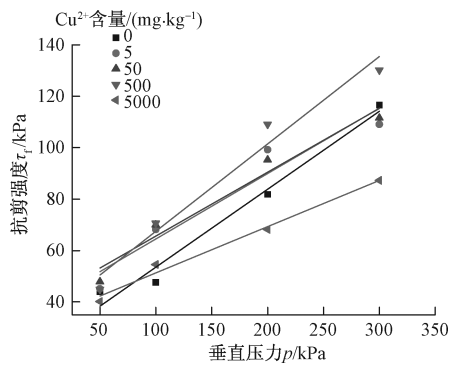


图 7 Cu²⁺ 污染土抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 7 The τ_t - p curves of remolded loess contaminated by Cu²⁺

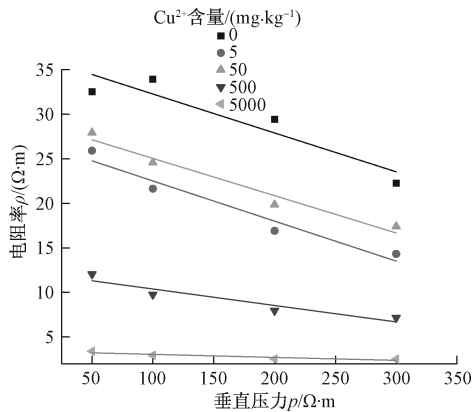


图 8 Cu²⁺ 污染土电阻率与垂直压力关系

Fig. 8 The ρ - p curves of remolded loess contaminated by Cu²⁺

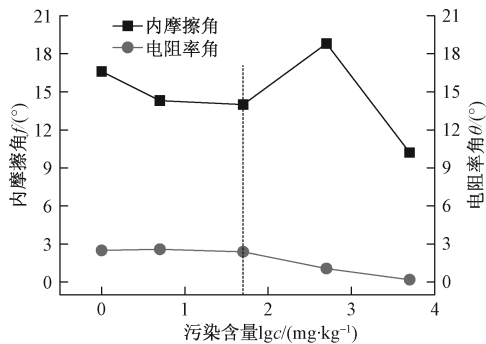


图 9 Cu²⁺ 污染土内摩擦角、电阻率角与含量关系曲线

Fig. 9 The φ -lgc curves of remolded loess contaminated by Cu²⁺

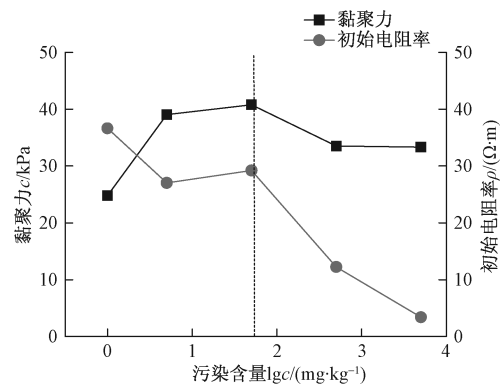


图 10 Cu²⁺ 污染土黏聚力、初始电阻率与含量关系曲线

Fig. 10 The c -lgc curves of remolded loess contaminated by Cu²⁺

3 结论

探寻了在不同 Cu²⁺ 含量下污染重塑土抗剪强度和电阻率的关系以及直剪过程中电阻率的变化规律,同时深入分析了 Cu²⁺ 污染重塑土抗剪强度、电阻率、含量三者之间的相互关系,并定义了电阻率参数,所得结论如下。

(1) 随 Cu²⁺ 含量的增加,电阻率减小,电阻率随剪切位移的增加呈减小的趋势,最后趋于平稳,污染含量越大,电阻率随位移的变化越稳定,但减小的趋势变得不那么明显,含量 500 mg/kg 时的电阻率浮动小,规律明显;Cu²⁺ 污染土的剪应力随位移增加而不断增加,没有屈服点。

(2) Cu²⁺ 含量小于 5 mg/kg 时,Cu²⁺ 污染土抗剪强度随 Cu²⁺ 含量增加而增加,Cu²⁺ 含量大于 500 mg/kg 时,Cu²⁺ 污染土抗剪强度随 Cu²⁺ 含量增加而减小;同一含量下的污染土在不同垂直压力下的抗剪强度与电阻率呈负相关,Cu²⁺ 含量越大抗剪强度变化对电阻率越不敏感。

(3) 定义了电阻率角、初始电阻率,电阻率角反映电阻率对土体结构变化的敏感程度,初始电阻率为土体在没有垂直压力作用下时的电阻率;当 Cu²⁺ 含量小于 50 mg/kg 时,内摩擦角与电阻率角随含量增加而减小,当 Cu²⁺ 含量大于 50 mg/kg 时,黏聚力

与初始电阻率随含量增加而减小。

参 考 文 献

- 薛祖源. 国内土壤污染现状特点和一些修复浅见. 现代化工, 2014;34(10):1—6
Xue Zuyuan. Present situation characteristics of soil pollution in china and some suggestions for remediation. Modern Chemical Industry, 2014;34(10):1—6
- 梁艳茹, 和文祥, 邢少峰, 等. 不同价态铬对土壤碱性磷酸酶活性的影响. 西北农林科技大学(自然科学版), 2010;38(3):156—160
Liang Yanru, He Wenxiang, Xing Shaofeng, *et al.* Effects of different valence chromium on soil alkaline phosphatase activity. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2010;38(5):156—160
- 朱春鹏, 刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展. 岩土力学, 2007;28(3):625—630
Zhu Chunpeng, Liu Hanlong. Study on engineering properties of polluted soil. Rock and Soil Mechanics, 2007;28(3):625—630
- 陈日高, 马福荣, 庞迎波. 重金属污染土强度特性试验研究. 土木建筑与环境工程, 2014;36(6):94—98
Chen Rigao, Ma Furong, Pang Yingbo. Experimental analysis of the strength properties of the heavy metal contaminated soil. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014;36(6):94—98
- 王 勇, 曹丽文, 温文富, 等. 生活钠铵盐污染对黏性土水理力学性质的影响. 工业建筑, 2012;43(9):83—87
Wang Yong, Cao Liwen, Wen Wenfu, *et al.* Effect of domestic sodium and ammonium salt pollution on hydro physical and mechanical properties of cohesive soils. Industrial Construction, 2013;43(9):83—87
- 储 亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 重金属锌污染淤泥质粉质黏土物理特性试验研究. 地下空间与工程学报, 2014;10(6):1312—1316
Chu Ya, Liu Songyu, Cai Guojun, *et al.* Study on the physical and electrical properties of silty clay contaminated by heavy metal Zinc. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014;10(6):1312—1316
- 饶卫国, 马福荣, 陈日高, 等. 重金属污染对土压实性及抗剪强度影响的试验研究. 工业建筑, 2013;43(4):92—97
Rao Weiguo, Ma Furong, Chen Rigao, *et al.* Experimental research on the effect of the heavy metal pollutants on soil compactness and shear strength. Industrial Construction, 2013;43(4):92—97
- 程 峰, 王星华, 莫时雄. 重金属质量比对污染土土工性能的影响研究. 矿业工程, 2014;34(5):14—18
Cheng Feng, Wang Xinghua, Mo Shixiong. Effects of mass ratio of heavy metal on geotechnical properties of contaminated soil. Mining and Metallurgical Engineering, 2014;34(5):14—18
- Mark L K. Complex NAPL site characterization using fluorescence part 1: selection of excitation wave length based on NAPL composition. Soil and Sediment Contamination, 2004;(3):103—118
- Weller A, Franges W. Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste. Journal of Applied Geophysics, 2004;40(2—3):67—83
- 王玉玲, 王彦文, 能昌信, 等. 重金属污染场地电阻率法勘探的建模和仿真. 计算机仿真, 2013;30(1):419—422
Wang Yuling, Wang Yanwen, Neng Changxin, *et al.* Modeling and simulation of heavy metal contaminated sites survey using DC resistivity method. Computer Simulation, 2013, 30(1):419—422
- 南京水利科学研究院. GB/T 50123—2003 土工试验方法标准. 北京: 中国计划出版社, 1999
Nanjing Research Institute of water conservancy. GB/T 50123—2003 Standard for soil test method. Beijing: China Plan Publishing Company, 1999

Study on Shear Strength and Electrical Resistivity of Remolded Loess Contaminated by Cu^{2+}

YANG Bo, LI Yi, DONG Xiao-qiang*

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

[Abstract] To study the shear strength and electrical resistivity of remolded loess contaminated by Cu^{2+} in different quantity, laboratory tests were conducted. Remolded loess samples contaminated by Cu^{2+} was prepared in the quantity of 0 mg/kg, 5 mg/kg, 50 mg/kg, 500 mg/kg, 5000 mg/kg, then tested the electrical resistivity and shear strength, handled and analyzed the dates. The results showed that: with Cu^{2+} increasing, the electrical resistivity decreased, and floated smaller, the principle was better and the floating was smaller when Cu^{2+} was 500 mg/kg; with the displacement increasing, the shear strength increased all through; when the quantity of Cu^{2+} was smaller than 5 mg/kg, the shear strength increased with the Cu^{2+} increasing, when the quantity of Cu^{2+} was bigger than 500 mg/kg, the shear strength decreased with the Cu^{2+} increasing, the larger the electrical resistivity, the smaller the shear strength; with Cu^{2+} increasing, the shear strength was less sensitive to electrical resistivity; defined the electrical resistivity grade and the original electrical resistivity of remolded loess, the larger the electrical resistivity it can reflect the changes of the soil's structure better, the original electrical resistivity stand for the electrical resistivity when there was no press on the soil.

[Key words] Cu^{2+} remolded loess shear strength electrical resistivity