

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.016

## 重金属污染土强度特性试验研究

陈日高, 马福荣, 庞迎波

(广西经济管理干部学院 土木工程系, 南宁 530007)

**摘要:** 通过将重金属冶炼企业的尾矿库、废料堆填区采取重金属尾矿样品, 与无污染净土进行混合, 制作不同重金属污染物含量的土样, 进行物化分析、直接剪切试验与无侧限抗压强度等试验, 研究了重金属污染物的不同含量对土体强度特性的影响。试验结果表明, 重金属污染物对土体强度特性有较大影响, 随着污染物浓度的增加, 其粘聚力增大, 则内摩擦角呈降低趋势。在同一含水量的情况下, 随着重金属污染土含量的增加, 其强度总体上有减小的趋势。强度随着重金属污染土掺入比的增加, 其降低量也逐渐增加, 降低量约为 35%~60%。重金属污染物通过土颗粒间双电层与水膜厚度与表面性质, 打破颗粒间的电离平衡, 从而改变土体的强度性质。

**关键词:** 重金属; 污染土; 抗剪强度; 力学性质

**中图分类号:** TU432      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2014)06-0094-05

## Experimental Analysis of the Strength Properties of the Heavy Metal Contaminated Soil

Chen Rigao, Ma Furong, Pang Yingbo

(Department of Civil Engineering and Architectural, Guangxi Economic Management Cadre College, Nanning 530007, P. R. China)

**Abstract:** The samples contaminated by heavy metal were taken from tailing pond and landfill site of wastes. The different heavy metal contamination samples with different incorporation ratio are respectively mixed with the undisturbed soil. The content analysis of heavy metal, direct shear test and unconfined compression strength test are carried out in order to study the strength properties of the heavy metal pollution. The results of test and analysis show that: the heavy metal pollution has a very strong impact on the strength properties of soil. With the increase of concentration of heavy metal pollutants  $i$ ,  $c$ -value gradually increased and  $\varphi$  value decreased. Under the same water content, the unconfined compression strength is reduced with the increase of heavy metal content. The strength will decrease by approximately 35%~60%. The characteristics of the diffuse double layer and the thickness of the water film between the soil particles will change when the heavy metal contaminants the soil, the balance relationship between cationic and anionic on the soil surface will also be broken. Therefore, the strength properties of the contaminated soil will change.

**Key words:** heavy metals; contaminated soil; shear strength; mechanical properties

随着重金属资源开发和加工的不断发展, 近年来中国重金属污染事件频发, 据不完全统计, 已出现 30 多起重金属污染事件<sup>[1]</sup>。中国 1.2 亿  $\text{hm}^2$  农田中, 至少 10% 受到重金属污染。国土资源部曾公开

收稿日期: 2014-03-15

基金项目: 广西自然科学基金(2011GXNSFB018002); 广西教育厅科研项目(200103YB194)

作者简介: 陈日高(1964-), 男, 教授级高工, 主要从事水泥、混凝土及固体废弃物利用研究, (E-mail) 563883836@qq.com。

表示,中国每年有1 200万t粮食遭到重金属污染,直接经济损失超过200亿元<sup>[2]</sup>。为了遏制重金属污染的继续,环保部近期出台了《重金属污染综合防治“十二五”规划》,列出了湖北、江苏等14个重金属污染综合防治重点省区和138个重点防治区域,将镉、铅、砷、汞和铬这5种有毒金属列为治理重点。广西也是14个重金属污染防治重点省区之一。广西作为中国重点有色金属产区,锡、锑、钨、铝、铅锌等有色金属的探明储量在全国居前列,在发展资源优势的同时也面临着重金属污染的严峻考验。

重金属污染事件的不断发生,已经引起学者们的高度注意,相当多学者在重金属污染方面对农业、环境、健康与食品安全等方面做了大量研究,取得了可喜的成果;但鲜有学者涉及到岩土与工程方面,从工程应用角度去研究重金属污染土的影响问题<sup>[3]</sup>。其他国家于20世纪70年代开始注意到污染土环境与工程问题,集中于污染土的强度特性、固结特性,受污染后土体性质发生明显改变<sup>[4-9]</sup>。而中国对于污染土的研究主要集中于酸、碱溶液对地基土物理力学特性的影响<sup>[10-16]</sup>,对于重金属污染土体的研究主要涉及到污染土体的固化处理方面<sup>[17]</sup>与污染物的运移对土体性质的影响<sup>[18-19]</sup>。重金属尾矿和加工废物的弃置与处理成了令全社会头疼的迫切问题,特别是一些历史遗留矿区,重金属污染相当严重,也给尾矿库区、废料堆填区以及周边居民区造成较为严重的环境岩土工程问题<sup>[20]</sup>。因此,从岩土工程的角度分析重金属污染土的力学特性,对于重金属资源开采和加工区域的工程建设与安全、历史遗留矿区处置和利用具有极大的现实意义。本文通过现场取样,进行物化分析、直接剪切试验与无侧限抗压强度试验,分析和研究不同重金属污染土的力学特性与工程应用性。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验所用土样均来自尾矿库、废料堆填区,取自地表以下0.2m及以下的污染土。共采取3种污染土样,①、②号污染土样来源于锰矿加工与堆填区;③号土样取自铅锌矿加工的尾矿库。

### 1.2 物化分析试验

①、②号污染土样厂区均为加工锰产品企业,矿物主要为 $MnO_2$ 、 $MnCO_3$ 、 $MnSO_4$ 矿;③号污染土样厂区均为加工Pb、Zn矿。利用原子吸收分光光度法测定了尾矿中重金属含量,测试结果如表1所示。

表1 污染土重金属含量分析表 mg/kg

| 样品号 | Mn    | Pb    | Zn  | Cr | Cd  |
|-----|-------|-------|-----|----|-----|
| ①号  | 49.2  |       | 190 | 40 | 0.2 |
| ②号  | 105.3 | 40    | 90  | 30 |     |
| ③号  |       | 1 760 | 220 | 50 | 1.0 |

### 1.3 抗剪强度试验

为探讨随着重金属含量的变化对土体强度的影响,特进行不同重金属含量下的直接剪切试验。分别对①、②、③试样进行处理,先对试样在105℃烘干,并碾成粉末过5mm筛备用。以污染土与无污染净土按照质量比进行混合制作试样,将准备好的重金属污染土分别按为净土的10%、30%、50%、80%的量掺入到净土中,按同一密度进行制作直接剪切试验试样。

### 1.4 无侧限抗压强度试验

为探讨重金属污染土的承载性能,分析重金属污染物是否对土体的内部结构具有一定的破坏作用,以及观察重金属污染土的破坏形态,进行无侧限抗压强度试验。试验用样与抗剪强度试验用样一致,以污染土与无污染净土按照质量比进行混合制作试样,将准备好的重金属污染土分别按为净土的10%、30%、50%的量掺入到净土中,在不同含水量的情况下进行无侧限抗压强度试验。试样直径为100mm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 抗剪强度试验

将备好的净土与污染物按质量比为10%、30%、50%、80%的比例掺合,含水量为20%,湿密度为1.9g/cm<sup>3</sup>,并静置3d后试验。试验结果如表2所示,强度指标与掺入比关系曲线如图1。从图1可以看出,随着污染物浓度的增加,其粘聚力 $c$ 增大,则内摩擦角 $\varphi$ 呈降低趋势。①号土样随污染物含量的增加,粘聚力 $c$ 也随之增大,增幅约为36.5%,内摩擦角 $\varphi$ 随之降低,降幅约为53.5%;②号污染土的粘聚力 $c$ 值增幅较大,约为1倍,内摩擦角 $\varphi$ 降幅则为23%左右;③号污染土的粘聚力 $c$ 增幅约为85%,内摩擦角 $\varphi$ 降幅约为31%。当重金属污染物含量较低时,其强度与净土相当,略有变化,当重金属污染物含量由低变高时,其强度变化存在一个急速变化到缓慢变化的过程,最终趋于一稳定态势。

表 2 不同掺入比的抗剪强度指标

| 掺入比/% | ①号    |                   | ②号    |                   | ③号    |                   |
|-------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
|       | c/kPa | $\varphi/(\circ)$ | c/kPa | $\varphi/(\circ)$ | c/kPa | $\varphi/(\circ)$ |
| 10    | 60.1  | 22.8              | 50.5  | 24.3              | 48.9  | 28.7              |
| 30    | 66.0  | 18.8              | 75.5  | 22.3              | 69.2  | 26.8              |
| 50    | 72.1  | 14.6              | 93.6  | 20.1              | 79.2  | 22.8              |
| 80    | 82.2  | 10.6              | 105.6 | 18.7              | 90.3  | 19.8              |

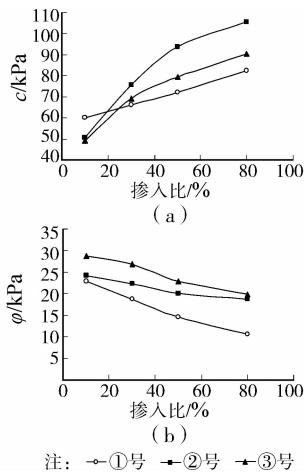


图 1 强度指标与掺入比关系

## 2.2 无侧限抗压强度试验

将备好的净土与污染物按质量比为 10%、30%、50% 的比例掺合,随着含水量的变化制作污染土试样,

含水量从 17% 变化到 27%,湿密度为  $1.9 \text{ g/cm}^3$ 。测试土样随着不同重金属污染物含量与含水量的变化,其强度变化规律。试验结果见表 3,随着含水量变化,不同重金属污染土强度变化曲线如图 2 所示。从表 3 可以看出在同一含水量的情况下,随着重金属含量的增加,其强度总体上有减小的趋势。随着含水量的增加,强度降低比较明显,强度随着掺入比的增加,其降低量也逐渐增加,降低量约为 35%~60%。图 2(a)、(b)、(c)分别为重金属污染物含量为 10%、30%、50% 的强度随含水量变化曲线。随着含水量的增加,不同掺入比试样的抗压强度呈减小趋势,比较各掺入比下的 3 种土样,受 Pb、Zn 重金属离子污染土体强度随含水量增加强度降低率大于受 Mn 离子污染土体,当土体含水量增加 8% 时,③号土样强度降低 60%~75%,①、②土样强度降低 20%~45%。试验中分别观察了不同含水量下试样的破坏形态,最具代表性的破坏图片如图 3 所示。图(a)试样破坏形式明显不同于其它两试样,图(a)试样受力后,出现竖向裂纹,表现为劈裂破坏,这与其含水量、重金属含量相关。图(b)、(c)试样受压后均产生了斜裂缝,倾角约  $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ ,明显发生了剪切破坏。从图 3 可以看出,随着含水量的增大,试样发生鼓胀破坏。从表 3 可见,当含水量的增长超过一定值时应力明显跌落,强度大幅度降低。

表 3 不同掺入比下的抗压强度变化表

kPa

| 含水量 $w/\%$ | 10%   |       |       | 30%   |       |       | 50%   |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | ①     | ②     | ③     | ①     | ②     | ③     | ①     | ②     | ③     |
| 17         | 649.4 | 713.0 | 611.2 | 585.7 | 560.2 | 547.5 | 738.5 | 585.7 | 407.4 |
| 20         | 623.9 | 649.4 | 509.3 | 560.2 | 483.8 | 394.7 | 700.3 | 420.2 | 127.3 |
| 23         | 573.0 | 598.4 | 445.6 | 534.8 | 343.8 | 191.0 | 662.1 | 369.2 |       |
| 25         | 483.8 | 483.8 | 254.6 | 445.6 | 305.6 | 127.3 | 496.6 | 280.1 |       |
| 27         | 420.2 | 445.6 | 127.3 | 331.0 | 254.6 |       | 292.8 | 152.8 |       |

## 2.3 重金属污染物影响土体强度特性的演化机制

天然粘性土体遭受含重金属离子废液、选矿水浸泡,导致重金属离子入侵,改变土体性质。土体在遭受重金属污染物污染的同时,重金属污染物也破坏土体,改变土体内部结构,打破土体内部平衡关系,改变土颗粒表面电场,弱化颗粒间的相互连接,从而引起土体工程性质的改变。

1) 重金属离子改变了土颗粒表面的扩散双电层与水膜厚度

重金属污染物进入土体后改变了颗粒-颗粒-水

界面性质,从而影响土体性质。当重金属离子及附带产物进入土体后,阳离子总量增加,吸附层中阴离子被  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  中和的电量变多,土颗粒表面吸附的正电荷增多,增强了对阴离子的吸附作用,使得扩散双电层及粘土表面水化膜变薄,土颗粒间接触距离变小,联结能力增强,从而使得土体的粘聚力  $c$  值随污染物含量的升高而增大。不同价位的离子所带电荷多少是有区别的,同时电荷多少直接影响双电层与水膜厚度,当入侵阳离子属低价时,土颗粒表面所吸附的电量将少于高价位

离子入侵时的情况,从而扩散双电层厚度变化小于高价阳离子引起的。而废渣与废液常含有一定量的酸性物质,并共同作用于土体,土体在不同 pH 值环境中表现出的强度性质是有区别的。根据测试资料知重金属污染物中多含酸性物质,在酸性作用下,土体强度总体上是趋于降低的。

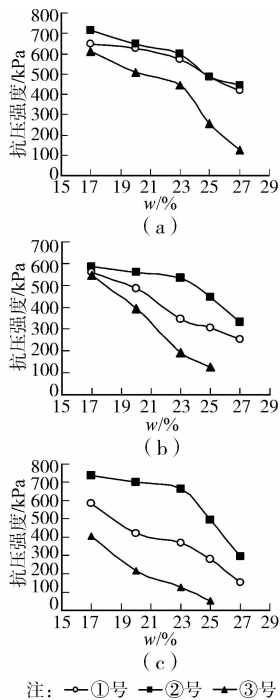


图2 不同掺入比下的强度变化曲线

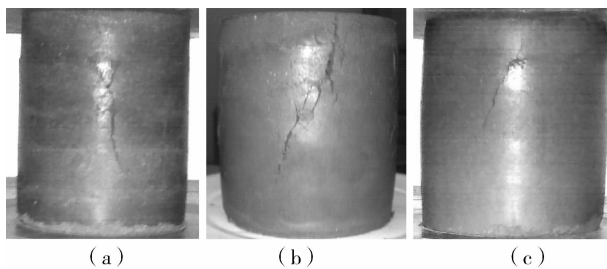


图3 试样受压破坏图

2) 重金属离子改变了土颗粒表面电场特性及颗粒间的相互连接

土颗粒间的相互联结、相互约束是离不开颗粒间的电场作用,土颗粒表面电场特性随其液态溶液 pH 值的变化而变化。净土为粘土,其矿物基本结构为铝氧八面体,八面体中的 Al—OH 键在重金属污染物的环境下将会电离出 OH 键,打破土颗粒表面电场平衡,土颗粒表面正电荷增多,增强对阴离子的吸附作用,粒间作用力由原来的引力逐渐转变为斥力。双电层厚度因之而变薄,颗粒间连接增强,土体结构形式也会随之改变,趋于变为凝聚结构,从而污

染土体的粘聚力有增长。而当重金属污染土体的强度会随着含水量与重金属离子含量而变化,在同一重金属含量下,随土体含水量增加,颗粒间水膜变厚,重金属离子的影响将会大大降低。

综上,重金属污染物改变土体表面性质,从而改变土体强度。

### 3 结论

通过采取不同重金属污染物实际土样,以不同掺入比与净土混合形成试样所需的污染土样,进行物化分析、直接剪切试验与无侧限抗压强度试验,研究重金属污染土的力学特性,得出以下结论:

1) 随着污染物浓度的增加,重金属污染土的  $c$  值增大, $\varphi$  值呈降低趋势。3 种类型重金属污染土的  $c$  值、 $\varphi$  值变化趋势一致。

2) 随着含水量的增加,重金属污染土的强度下降,3 种类型重金属污染土的强度下降趋势相似。

3) 重金属污染土的强度随着含水量的增加而下降,并且随着重金属污染物掺入比的增加,其强度下降幅度加大。

4) 重金属污染物通过改变土颗粒间双电层与水膜厚度与性质,打破颗粒间的电离平衡,从而改变土体的强度性质。

### 参考文献:

- [1] 史江涛. 重金属污染成环保治理重点[N]. 参考消息, 2011-02-28(16).
- [2] 李妍. 农田重金属污染触目惊心每年污染 1200 万吨粮食[N]. 中国经济周刊, 2011-02-22.
- [3] 饶为国, 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[J]. 工业建筑, 2013, 43(4): 92-97.
- Rao W G, Ma F R, Chen R G. Research on the mechanism of the heavy pollution and its effect on soil compaction and shear strength [J]. Industrial Construction, 2013, 43(4): 92-97.
- [4] Prasanna R, Meegoda J N. Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(2): 133-140.
- [5] Silva E, Pacheco D, Rogério E E. Copper chloride contamination influence on the shear strength of soils used as liners [J]. Solos e Rochas, 2005, 28(3): 283-294.
- [6] Maaitah O N, Tarawneh S A. Effect of treated and raw wastewater on the behavior of unsaturated soil [J]. Journal of Applied Sciences, 2003, 3: 360-369.
- [7] Singh S K, Srivastava R K. Settlement characteristics of

- clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2008, 17(3): 290-300.
- [8] Sedman A, Talviste P. Geotechnical characterization of Estonian oil shale semi-coke deposits with prime emphasis on their shear strength [J]. *Engineering Geology*, 2012, 131/132: 37-44.
- [9] Du Y J, Jiang N J. Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 225-226: 195-201.
- [10] 朱春鹏, 刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 625-630.  
Zhu C P, Liu H L. Study on engineering properties of polluted soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 625-630.
- [11] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1146-1152.  
Zhu C P, Liu H L, Shen Y. Laboratory tests on sheat strength properties of soil polluted by acid and alkali [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(7): 1146-1152.
- [12] 朱春鹏, 刘汉龙, 张晓璐. 酸碱污染土压缩特性的室内试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(10): 1477-1483.  
Zhu C P, Liu H L, Zhang X L. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(10): 1477-1483.
- [13] 李琦, 施斌, 王有诚. 造纸厂废碱液污染土的环境岩土工程研究[J]. *环境污染与防治*, 1999, 19(5): 16-18.  
Li Q, Shi B, Wang Y C. Environmental-geotechnical properties of soils contaminated by waste alkaline liquor from paper mills [J]. *Environmental Pollution and Control*, 1999, 19(5): 16-18.
- [14] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性性质变异研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(8): 1229-1233.  
Li X R, Yao Z X, Cao Z B. Study on physical and mechanical property variation of polluted erosive foundation soils in typical district of Jinan [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1229-1233.
- [15] 曹海荣. 酸性污染土物理力学性质的室内试验研究[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 27(2): 60-65.  
Cao H R. Research on physical-mechanical property of soil contaminated by acid in laboratory [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2012, 27(2): 60-65.
- [16] 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[J]. *工业建筑*, 2013, 43(9): 83-87.  
Wang Y, Cao L W, Wen W F, et al. Effect of domestic sodium and ammonium salt pollution on hydrophysical and mechanical properties of cohesive soils [J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(9): 83-87.
- [17] 查甫生, 刘晶晶, 崔可锐, 等. 水泥固化稳定重金属污染土的工程性质试验研究[J]. *工业建筑*, 2012, 42(11): 74-77.  
Zha F S, Liu J J, Cui K R, et al. Engineering properties of solidified and stabilized heavy metal contaminated soils with cement [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(11): 74-77.
- [18] 饶为国, 张志红, 许照刚. 基于污染源浓度随时间衰减的土壤污染物运移模型[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(6): 102-106.  
Rao W G, Zhang Z H, Xu Z G. Contamination transport model of soil considering contaminated source concentration attenuation with time [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(6): 102-106.
- [19] 张志红, 许照刚, 杜修力. 吸附模式及固结变形对溶质运移规律的影响研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(1): 104-111.  
Zhang Z H, Xu Z G, Du X L. Study on the effects of adsorption modes and consolidation deformation on solute transport [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(1): 104-111.
- [20] 张新英, 赵才流, 吴浩东, 等. 广西一个典型矿业镇环境中重金属污染分析[J]. *中国环境监测*, 2008, 24(4): 79-83  
Zhang X Y, Zhao C L, Wu H D, et al. Situation of heavymetal contamination in a typical mining town of Guangxi, South China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(4): 79-83.

(编辑 王秀玲)