

铅污染土壤的淋溶后对土体稳定性的影响研究

舒晓晓^{1,2,3,4,5*}, 叶胜兰^{1,2,3,4,5}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴自然资源部土地工程技术创新中心, 陕西 西安

⁵陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月12日; 录用日期: 2021年11月12日; 发布日期: 2021年11月22日

摘要

为探究铅污染土壤淋溶后对土体稳定性的影响, 本文采用室内淋溶试验, 设置不同容重不同粒径下铅污染土壤淋溶试验。结果表明, 当竖向荷载力 $P = 800 \text{ kPa}$ 时, A处理($\rho = 1.0 \text{ kg/cm}^3$)相比D处理($\rho = 1.4 \text{ kg/cm}^3$)压缩变形量增加2.9%~13.9%, 且粒径越大变形量越大。抗剪强度随容重增大而增强, 竖向应力达到400 kPa时, D处理($\rho = 1.4 \text{ kg/cm}^3$)相比A处理($\rho = 1.0 \text{ kg/cm}^3$)抗剪强度增加11.4%~18.6%, 内摩擦角值增加1.73°~3.14°。但土壤的黏聚力大小与粒径相关, 粒径越小, 黏聚力越大, D1相比D3的黏聚力增加了10.91 kPa。因此, 容重较大、土壤粒径较小的土壤进行重金属铅淋溶后土体较为稳定。

关键词

铅, 淋溶, 土体, 稳定性

Study on the Influence of Lead-Contaminated Soil on Soil Stability after Leaching

Xiaoxiao Shu^{1,2,3,4,5*}, Shenglan Ye^{1,2,3,4,5}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

*第一作者。

Abstract

To explore the influence of lead-contaminated soil on soil stability after leaching, in this paper, an indoor leaching test is used to set up a lead-contaminated soil leaching test with different bulk densities and different particle sizes. The results show that when the vertical load $P = 800$ kPa, the compression deformation of treatment A ($\rho = 1.0$ kg/cm³) increases by 2.9% to 13.9% compared with treatment D ($\rho = 1.4$ kg/cm³), and the larger the particle size is, the greater the amount of deformation is. The shear strength increases with the increase in bulk density. When the vertical stress reaches 400 kPa, the shear strength of treatment D ($\rho = 1.4$ kg/cm³) increases by 11.4%~18.6% compared with treatment A ($\rho = 1.0$ kg/cm³). The value of the internal friction angle increased by 1.73°~3.14°. However, the cohesion of the soil is related to the particle size. The smaller the particle size is, the greater the cohesion is. Compared with D3, the cohesion of D1 increases by 10.91 kPa. Therefore, soil with larger bulk density and smaller soil particle size is more stable after heavy metal lead leaching.

Keywords

Lead, Leaching, Soil, Stability

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来,我国取得了长足发展,与此同时,我国也成为了污染最严重的国家之一。《全国土壤污染状况调查公报》显示,仅我国耕地土壤的污染指数高达 19.4%,其中 Cr、Ni、Cu、Hg、Pb、As、多环芳烃等污染物占主要部分[1]。污染土壤中的重金属除了可以在土壤-植物系统中迁移转化,影响植物的生长及农产品质量安全,还通过影响黄土抗剪性、土体强度影响土体地基强度,引发一系列工程问题[2]。

铅(Pb)是最严重的重金属污染元素之一,易造成人类生殖障碍[3]。过量的铅会损伤肠胃健康、毒害肾脏,损害神经,导致高血压、铅性贫血,影响人的智力发育,降低人体免疫力[4]。2009 至 2011 年,我国已经发生了 30 多起重特大重金属污染事件[5],血铅超标事件 11 起,涉及河南、江西、陕西、湖南、云南、广东、浙江、安徽等 8 个省份,仅 2009 年就有 4035 人血铅超标[6]。过去 50 年间排放到全球环境的 Pb 已达 7.83×10^5 吨[7]。2012 年调查发现广州市场上销售的蔬菜、水果铅超标达正常的 5 倍多[8]。铅污染已蔓延至生活的方方面面,因此,进行重金属中 Pb 污染防治至关重要。

有关重金属铅污染防治,众多学者已进行了大量研究,有研究发现通过静态浸泡、动态淋溶模拟试验研究发现,废石粒度、成分、溶液 pH、温度、固液比等均会影响废石性质和物化条件下有害组分的释放迁移规律[9][10]。林海等[11]通过进行实验室静态淋溶试验得出,淋出液中 V、Pb、Cd、Cr、As 溶出量随粒度的增加而降低。张延玲等[12]在试验中,土壤孔隙率随重金属离子浓度升高而增加。王文军等[13]对锌污染淤泥质黏土的压缩与渗透特性进行试验研究得出,土壤孔隙率变大,土体结构松散会导致土体

力学特性变差, 压缩变形量增大。王楠等[14]研究中, 土壤的内摩擦角也与容重成正相关关系, 总是在高密度下, 内摩擦角较大。但 Lambe 等[15]研究表明: 土体的内摩擦角的大小与土颗粒结构、矿物成分及其几何排列有关。土颗粒分布越不规则, 其内摩擦角越大。

但这些研究大多集中于重金属修复, 对于其在土壤深层的内在运移规律研究较少, 且针对性的开展粒径与容重对其影响尚少, 淋溶结束后其土体结构会如何变化未有明确结论。且重金属由于其隐蔽性、积累性和持久性, 破坏土壤结构, 随水入渗至下层[16]。特别是在工程治理中, 由于各地区的土壤或者是河流不尽相同, 若对其淋溶机理不清, 不能对症下药, 修复其污染, 往往造成人力、物力资源严重浪费。因此, 本文通过监测 Pb 在土壤深层中的运移规律, 探究淋溶对土体稳定性的影响, 为开展铅污染修复提供有效的科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区位于陕西地建土地工程技术研究院富平中试基地, 年平均气温 13℃, 年降水量约 510 mm, 集中在 6~9 月, 属暖温带半湿润偏旱季风气候, 农业生产以旱作农业为主。供试土壤为黄土母质发育的壤土。且铅污染土壤的铅含量为 620.74 mg/kg, 土壤 PH 为 8.41, 有机质含量为 9.72 g/kg, 全氮含量为 0.81 g/kg, 有效磷含量为 7.8 mg/kg, 速效钾含量为 166.78 mg/kg。

2.2. 仪器

小环刀(直径为 6.18 cm, 高 2 cm)、WG 型单杠杆固结仪(南京宁曦土壤仪器有限公司)、淋溶土柱(装置总高度为 100 cm, 内径 10 cm 的有机玻璃土柱)。

2.3. 试验方法

2.3.1. 装填

试验采用室内土柱淋溶模拟试验。选择容重 1.0 g/cm³、1.4 g/cm³ 的两组容重水平, 设置粒径三组粒径水平(<1 mm、1~2 mm、>2 mm)含量大于 80% 装柱, 共设置 6 个处理, 每 30 cm 柱体的填充粒径不同, 具体处理填充如表 1。

Table 1. Different treatment soil column packing schemes

表 1. 不同处理土柱填充方案

土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤粒径分布	填充土层/cm	代号
1.0	<1 mm	0~90	A1
1.0	1~2 mm	0~90	A2
1.0	>2 mm	0~90	A3
1.4	<1 mm	0~90	D1
1.4	1~2 mm	0~90	D2
1.4	>2 mm	0~90	D3

土柱采用有机玻璃, 柱体底部用铁丝网包扎。安装时, 将土柱壁边缘的土壤压实, 抹上一层凡士林且每隔 30 cm 设置淋溶液出水口。土柱填充时从下至上, 柱底自下而上依次放置铁丝网、石英砂、滤纸, 柱身每隔 30 cm 设出水孔, 孔内安装插入导流装置。为防止土粒阻塞导流装置, 采用 200 目尼龙布包裹。

柱体上层填充厚度 20 cm 的污染土壤, 土壤表层放滤纸、垫 2 cm 厚的洁净石英砂, 防止加水后扰动土壤表层, 上方间隔 10 cm 处设置滴灌加水点, 确保无贴壁水流入渗, 尽量减少边缘效应的产生。土壤淋溶试验时, 需用保鲜膜封住土柱顶部, 防止水分蒸发。

每个处理根据 0~30 cm、30~60 cm、60~90 cm 分别记为土层 1, 2, 3。重复 3 次, 淋溶时采用间歇式淋溶方式, 使土壤有一定的反应时间。淋溶前, 土柱分别用去离子水淋洗至土壤饱和。每次淋溶灌水量 500 mL, 每 3 天淋溶一次, 取各层淋出液进行测定, 共淋溶 8 次, 合计 4000 mL, 约合当地降雨量 510 mm。淋溶结束后, 分层取土, 淋溶结束后, 进行土壤固结试验和直剪试验测定其土体稳定性。

2.3.2. 固结试验

淋溶结束后, 进行土壤固结试验。固结试验采用一维侧限压缩, 仪器为 WG 型单杠杆固结仪(南京宁曦土壤仪器有限公司)。试验土样为小环刀样(直径为 6.18 cm, 高 2 cm)。用小环刀从经过淋溶后的土柱中切取样品, 每种类型切取两个小环刀样进行测试, 试验过程中的加压等级依次为 12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、600 kPa、800 kPa。

施加每级压力后 24 h 测定试样高度变化作为稳定标准, 每间隔 1 小时变形小于 0.01 mm 时, 作为稳定读数; 测定沉降速率时, 施加每一级压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度变化。时间为 6 s、15 s、1 min、2 min 15 s、4 min、6 min 15 s、9 min、12 min 15 s、16 min、20 min 15 s、25 min、30 min 15 s、36 min、42 min 15 s、49 min、64 min、100 min、200 min、400 min、23 h、24 h, 至稳定为止; 之后记下稳定读数后, 施加第二级荷载。依此逐级加荷, 至试验结束。最后一级荷载稳定后, 先卸除百分表, 然后卸除砝码, 升起加压框, 拆除仪器各部件, 取出试样, 测定含水率。压缩试验过程中需注意加载杠杆始终保持水平, 避免误差。

2.3.3. 直剪试验

采用快剪对土样的抗剪强度进行测试, 利用环刀(直径为 6.18 cm, 高 2 cm)从淋溶过后的土柱中切取土样, 每组试验切取四个样品, 施加垂直压力分别为 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa 进行直剪试验。

首先按要求的干密度称出一个环刀体积所需的风干试验, 制备三份试样, 在三种不同竖向压力下进行剪切。取出剪切容器的加压盖及上部透水石, 将上下盒对准, 插入固定鞘, 将试样徐徐倒入剪切容器内, 试样上依次放好透水石、加压盖、钢珠和加力框架, 徐徐转动手轮至量力环上的百分表长针微微转动为止, 将百分表的长针调至零, 开始施加第一级垂直压力, 100 kPa, 拔去固定鞘, 以 8 s/r 的均匀速率转动手轮, 使试样在 3~5 分钟内剪破。试验时, 剪破的判断标准为: 1) 当百分表度数不变或明显后退; 2) 百分表指针不后退时, 以剪切位移为 4 mm 对应的剪应力为抗剪强度, 这时剪切至剪切位移达 6 mm 时才停止剪切。卸除压力, 取下加力框架、钢珠、加压盖等, 倒出试样, 刷净剪切盒。改变垂直压力, 重复操作, 200 kPa 和 400 kPa 下进行试验。应注意, 在直剪时, 土是不均匀的, 试样密度、含水率是影响抗剪强度的重要因素, 因此, 制样时应尽可能保证试样均质, 含水率和密度保持一致, 保证试验的准确性。

2.4. 数据处理

采用 SPSS (PASW Statistics 20) 统计分析软件对数据进行统计分析, 显著性水平设定为 $P = 0.05$, Excel 2010 绘制图表。

3. 结果与分析

3.1. Pb^{2+} 淋溶后 0-30cm 土层竖向荷载的影响

图 1 中由于土壤 Pb^{2+} 污染主要集中于 0~30 cm 土层, 淋溶结束后选取不同容重不同粒径下该土层的土壤剖面样品, 进行固结试验和直剪试验, 测定淋溶后土壤的力学性质。图 1 中, 竖向荷载压力加载初期(竖向压力 < 200 kPa)时, ε - p 曲线较陡, 后期随着竖向压力增大, 变形逐渐趋于稳定。同一竖向荷载

作用下, 其压缩变形量趋势为 A 处理($\rho = 1.0 \text{ kg/cm}^3$)大于 D 处理($\rho = 1.4 \text{ kg/cm}^3$)。当 $P = 800 \text{ kPa}$ 时, 各处理的压缩变形量依次为 $A3 > A2 > A1 > D3 > D2 > D1$ 。同一粒径下 A 处理相比 D 处理变形量增加 2.9%~13.9%。同一容重同一竖向荷载作用下, 粒径越大变形量越大。

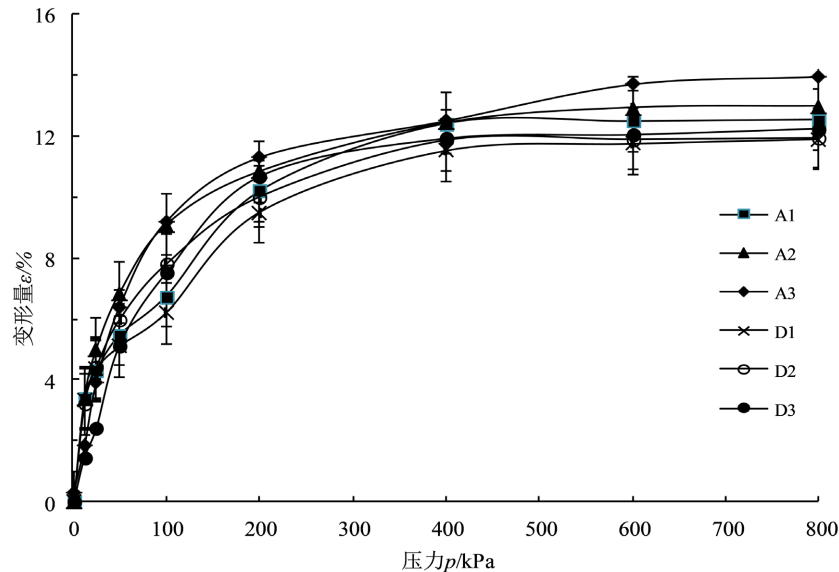


Figure 1. Soil consolidation test curve of 0~30 cm soil layer
图 1. 0~30 cm 土层土壤固结试验曲线

3.2. Pb^{2+} 淋溶后对土壤抗剪强度的影响

表 2 中, 随着竖向应力增加, 土壤的抗剪强度显著增加。同一粒径下, 容重越大抗剪强度越大, 竖向应力达到 400 kPa 时, 各处理的抗剪强度依次为 $D3 > D1 > D2 > A1 > A2 > A3$, D 处理相比 A 处理抗剪强度显著增加 11.4%~18.6%。土壤的黏聚力受粒径影响(表 2), 同一容重下, 土壤的黏聚力大小为 $A2 > A1 > A3$, $D1 > D2 > D3$ 。粒径越小, 黏聚力越大, D1 相比 D3 的黏聚力增加了 10.91 kPa。容重越大, 土壤的内摩擦角也越大, 同一粒径下, D 处理相比 A 处理内摩擦角值增加 $1.73^\circ \sim 3.14^\circ$; 同一容重下, 随粒径增加内摩擦角显著增大, A3 相比 A1 显著增加 1.35° , D3 相比 A3 显著增加 0.99° 。

Table 2. Results of direct shear test of soil under different particle diameters and bulk density

表 2. 不同粒径和容重下土壤直剪试验结果表

容重	处理	竖向应力/kPa	抗剪强度/kPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
1.0	A1	100	56.33b	10.04	24.74
		200	109.05b		
		400	203.97b		
	A2	100	59.31b	10.12	25.5
		200	103.24b		
		400	201.62b		
	A3	100	59.62b	8.86	26.09
		200	96.96b		
		400	196.13b		

Continued

		100	73.43a		
	D1	200	116.42a	16.56	27.88
		400	230.17a		
		100	73.43a		
1.4	D2	200	109.36a	15.77	27.23
		400	224.68a		
		100	73.43a		
	D3	200	96.96b	5.65	28.87
		400	232.53a		

4. 结论

本试验中淋溶结束后, 0~30 cm 土层土壤容重越大, 压缩变形量越小, 抗剪强度增大。同一容重下, 粒径越大, 压缩变形量越大; 土壤容重越大, 抗剪强度越大, 内摩擦角越大, 且同一容重下, 土壤黏聚力受粒径影响, 粒径越小, 黏聚力越大, 但内摩擦角越小。因此, 综合考虑土壤淋溶后土体结构的稳定性, 容重较大、土壤粒径较小的土壤进行淋溶后土体较为稳定。

基金项目

陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No. 2020JQ-1002)。

参考文献

- [1] 环境保护部和国土资源部发布全国污染状况调查公报[R]. 中华人民共和国环境保护部, 2016.
- [2] 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.
- [3] 吴琳, 林秋月, 刘思, 等. 铅中毒者 T 细胞受体-CD3 分子复合基因表达模式[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2013, 31(3): 201-204.
- [4] 王红梅, 于云江, 赵秀阁, 等. 铅神经毒性的分子生物学研究回顾与展望[J]. 现代预防医学, 2007, 34(20): 3856-3857.
- [5] 修珩, 陈建军. 重金属污染土壤超累积植物-作物联合修复研究进展[J]. 环境污染与防治, 2013, 2(2): 1-7.
- [6] 陈明, 王道尚, 张丙珍. 综合防控重金属污染保障群众生命安全[J]. 环境保护, 2010(3): 49-52.
- [7] 姜薇. 重金属污染物在红壤中迁移规律及修复技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 1-2.
- [8] 罗孟君, 陈宗高. 重金属污染现状与对策分析[J]. 广州化工, 2016, 44(3): 11-12.
- [9] Cappuyns, V., Alian, V., Vassilieva, E., *et al.* (2013) pH Dependent Leaching Behavior of Zn, Cd, Pb, Cu and As from Mining Wastes and Slags: Kinetics and Mineralogical Control. *Waste and Biomass Valorization*, **5**, 355-368. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9274-3>
- [10] Othmani, M.A., Souissi, F., Benzaazoua, M., *et al.* (2013) The Geochemical Behaviour of Mine Tailings from the Touiref Pb-Zn District in Tunisia in Weathering Cells Leaching Tests. *Mine Water and the Environment*, **32**, 28-41. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0210-8>
- [11] 林海, 李洁, 董颖博. 粒度对石煤钒矿废石重金属静态淋溶的影响规律[J]. 稀有金属, 2017, 41(6): 693-700.
- [12] 张延玲, 丁选明, 刘汉龙, 蒋春勇, 孙晓楠. 重庆某废铅冶炼厂重金属污染土壤微观结构特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 809-814.
- [13] 王文军, 陈勇, 蒋建良, 蔡国成. 碱、锌污染淤泥质黏土的压缩与渗透特性试验研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(2): 6-12.
- [14] 王楠, 赵友朋, 郭晓平, 等. 土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 809-814.

2018, 38(6): 88-94+102.

- [15] Lambe, T.W. (1958) The Structure of Compacted Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **84**, 1-34. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000114>
- [16] 李纪峰. 小议重金属污染治理的弊端及改善措施[J]. 中国新技术新产品, 2015(20): 167.