

非饱和粉质砂土中铜离子迁移的离心模型试验研究

Centrifuge modeling of copper ion migration in unsaturated silty clay

张建红, 严 冬

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文利用土工离心机进行了非饱和土中重金属铜离子迁移的模拟研究, 考察在污染物泄漏后的 6 个月、12 个月和 24 个月时土壤中铜离子的变化和污染物的迁移机理及其对地下水的影响, 同时也研究了土性对污染物迁移机理的影响。

关键词: 离心模拟; 铜离子; 非饱和土

中图分类号: TU 411.4; X 53

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)06-0792-05

作者简介: 张建红(1967-), 女, 河南信阳人。1996 年毕业于清华大学获岩土工程专业博士学位, 现为清华大学水利水电工程系副教授, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会理事、副秘书长。主要从事环境岩土工程和岩土工程方面的研究工作。

ZHANG Jian-hong, YAN Dong

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents the centrifuge modeling of copper ion migration in unsaturated soils. Variation of copper ions, migration mechanism of pollutants as well as their effect on underground water have been evaluated after the pollutants have been released for 6, 12 and 24 months. Effect of soil properties on pollutant migration mechanism is also presented.

Key words: centrifuge modeling; copper ion; unsaturated soil

0 前 言

由于固体废物填埋场和储油罐的泄漏, 农药和工业有毒有害物质的扩散, 土壤和地下水的长期污染问题日益严重。对污染场地的污染程度进行评价, 从而逐步实施分类治理, 对建立一个和谐的岩土工程环境至关重要。我们现在的工作都是在试验观察和理论分析上的积累, 近十年来, 多相流及多介质流及其物理、化学和微生物相互作用的模拟成为学术界的热点课题。然而, 由于污染物之间、污染物与岩土介质间复杂的相互作用, 无论是在试验和理论上对这种作用机理的理解都非常欠缺。认识和解决这些复杂环境下的岩土工程问题, 首先要求观察物理现象、把握物理机制。环境岩土工程通常涉及到三种物质迁移过程: 地下水流动、污染物扩散和热传递。重力的影响反映在三个方面: ①岩土介质的性质如渗透性和孔隙率是应力水平和应力历史的函数, 这些性质对渗流的影响非常显著; ②存在重力作用下的物质扩散过程, 如热对流导致的热传递和不同密度流体之间的作用; ③毛细区内及饱和土体的渗流主要由重力控制。因此, 在模型中获得与原型一致的应力分布非常重要。土工离心机能够模拟重力场, 并且能够对材料和水文地质条件作较为准确的模拟, 从而能模拟原型土体中控制土壤中物质传播的重要控制参数, 并在控制边界条件下模拟二维、三维问题, 进行毛细现象、渗流、热交换和污

染物迁移问题的机理研究。污染物扩散的离心模型试验研究始于 20 世纪 80 年代。欧洲 1996~2000 年建立了环境岩土试验研究网络 (NECER)^[1], 美国和加拿大许多著名大学和研究机构开展了环境岩土工程的离心模拟研究^[2]。目前, 我国也开展了这方面的研究^[3~5]。

重金属的毒性大、难降解, 因此, 其在土体和地下水中的流动性倍受关注。Gurung 等人^[6]利用鼓形离心机进行击实土中锌离子的穿透特性研究; Lo 等^[7]进行了饱和土中镉离子扩散的离心模拟研究; Basford 等^[8]进行了铅离子在土壤中扩散的初步研究。

铜是有毒重金属^[9], 对人和其他生物有一定的危害。本文利用土工离心机进行了非饱和土中重金属铜离子迁移的模拟研究, 考察在污染物泄漏后的六个月、12 个月和 24 个月时间里土壤中铜离子的变化和污染物的迁移机理及其对地下水的影响。

1 模型材料

图 1 为试验土的颗粒级配曲线, 其比重为 2.69。小于 0.005 mm 的黏粒占总重量的 3.2%, 土中不含有机质。平均粒径 0.14 mm, 不均匀系数 $C_u = 4.28$,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50109003); 教育部留学回国人员启动基金资助项目 (2001)

收稿日期: 2004-02-16

曲率系数 $C_c = 1.76$ 。饱和土的渗透系数为 5×10^{-4} cm/s。表 1 中列出天然土中重金属浓度^[9]，我国大部分土壤中含铜量为 $(1.5 \sim 6.0) \times 10^{-2}$ mg/g，平均为 2.0×10^{-2} mg/g。试验土中铜含量为 5.05×10^{-4} mg/g，远低于中国天然土中铜含量，可作为进行铜离子扩散试验的土料。模拟污染源采用粉末状的氯化铜（CuCl₂）配制浓度为 800 ppm（mg/L）的溶液 150 mL。

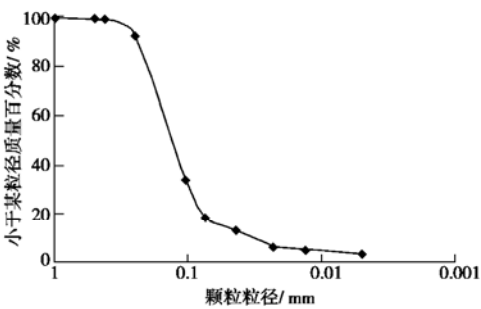


图 1 粉质砂土的颗粒级配曲线
Fig. 1 Grain size distribution curve
表 1 天然土壤中重金属的平均含量

Table 1 Mean content of heavy metals in natural soils					
重金属	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni
世界 ($\times 10^{-3}$ mg/g)	0.35	20	50	30 ^[12]	40
中国 ($\times 10^{-3}$ mg/g)	0.163	25	100	20	35

2 离心模型

本文的离心模型试验是在清华大学 50gt 型离心机上进行的，如图 2 所示^[10]。图 3 是离心模型的装置图。有机玻璃气动阀门是试验中的一个技术发明，它连接两个水箱，用于控制初始渗漏时刻，结构如图 3（b）所示，采用气动控制以代替电磁阀。因为电磁阀的阀身是不锈钢，阀身的铁原子很容易将铜置换出来形成铜粉，从而严重干扰试验。初始时供给气动阀门 200 kPa 的气压，使中间橡胶软管充气堵塞通路，卸掉气压则保证管路通畅。该阀门能够准确控制氯化铜溶液泄漏的时间。

模型模拟的是中砂以上 15 m 厚的一层均匀粉质砂土层，地下水位在该粉质砂土层下 1.5 m 深处，图 3c 显示的为原型尺寸。制样时将土分层击实到预定干密度并使之饱和。在离心机模拟的原型自重力场中，模型完成固结过程，并形成稳定的非饱和区和含水率分布。250 mL 氯化铜溶液预先置于水箱 A 中，当离心加速度达到 75g 时，打开气动阀门，使溶液进入水箱 B。通过水箱 B 底面的小孔渗入土中。试验时运转离心机分别至 6、12 和 24 个月（原型时间），然后停

机取样。由于是对称结构，取样点布置如图 4（a）所示，每次取土样 34 个。其中 A~E 为五个竖向剖面，1~7 为 7 个横向剖面，交叉点为取样点。铜离子的萃取方法见文献[7]，共进行 9 个离心模型试验。



图 2 清华大学 50gt 中型离心机
Fig. 2 50gt geotechnical centrifuge at Tsinghua University

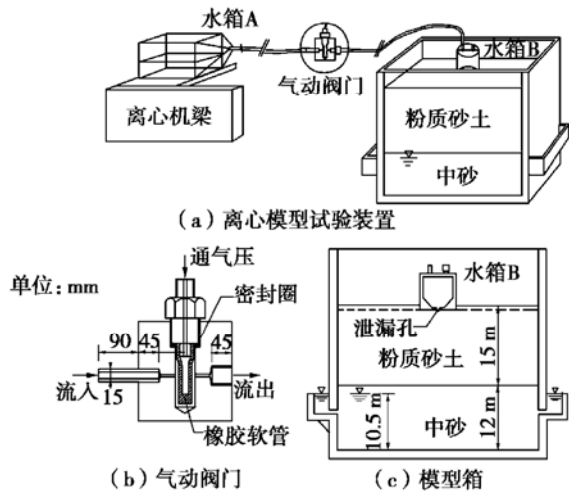


图 3 离心模型装量图
Fig. 3 Centrifuge model

3 试验结果和讨论

3.1 土壤污染程度随扩散时间的变化

粉质砂土固结前后的干密度分别为 1.60 g/cm³ 和 1.63 g/cm³。固结过程中沉降为 40 cm，沉降稳定时间为 2 个月，整个固结时间为 4 个月（原型时间）。

铜离子从容器中泄漏后，在土层中经历下面几种扩散过程和相互作用：①在水力梯度作用下随渗流运移，但是泄漏的溶液只能使泄漏点局部土层饱和，所以渗流速度随着时间推移逐渐减缓；②铜离子在浓度梯度的作用下，随分子扩散过程在土壤中迁移，这一过程受土壤含水率的影响；③土壤中的黏土矿物含有带负电荷的离子，对铜离子有很强的吸附作用，黏土矿物吸附强度的顺序为蒙特石、伊利石、高岭石。土壤中黏粒含量越高，吸附强度越大。铜离子也因此

滞留在土壤中,其浓度随距离扩散点的水平和竖直位置而不同。

在经历 6 个月、12 个月和 24 个月后,土层中含水率与铜离子浓度沿土层深度的分布如图 4 和 5 所示。这里仅显示了数值大于 0.5 mg/g 的铜离子浓度,因为低于此数值将受测试精度的影响。扩散深度也指的是 0.5 mg/g 的铜离子浓度所对应的深度。图 4 (b) 是含水率的沿深度的分布。6 个月时,因污染溶液的注入,含水率较高。12 个月和 24 个月时,含水率基本没有变化。说明在 0~12 个月间渗流作用非常强,这一点可以从后面的图 6 中得到类似的结论。图 5 是 A、B 和 C 剖面在 6 个月,12 个月和 24 个月时铜离子沿深度的分布。随时间增加,土层深处铜离子浓度逐渐增加,泄漏点处的浓度因此降低。

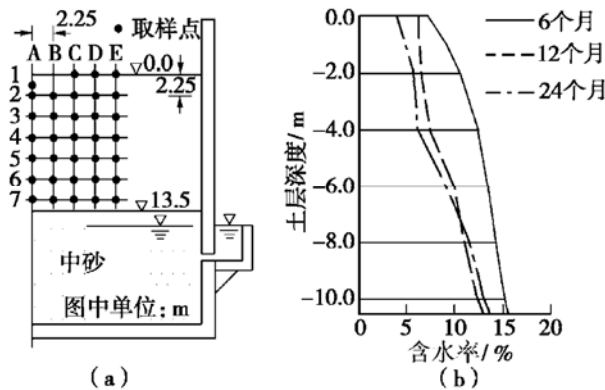


图 4 模型取样点和 6, 12 和 24 个月后土层的含水率分布

Fig. 4 Sampling points and moisture profiles at 6, 12 and 24 months

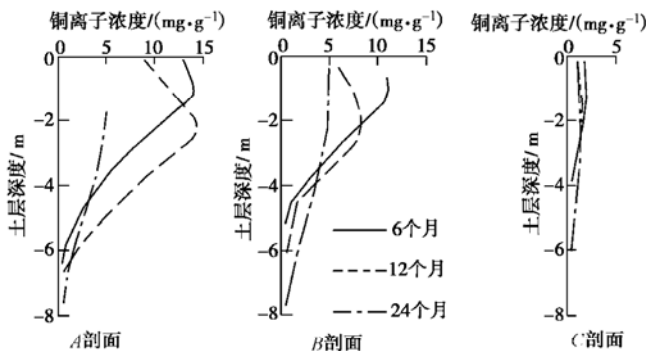


图 5 A、B 和 C 剖面铜离子浓度沿深度的分布

Fig. 5 Concentration distribution of A, B and C sections

图 6 为 6、12 和 24 个月后土层中铜离子浓度的等值线图,图中横坐标为土层宽度。6 个月后,铜离子从泄漏点向土壤中基本呈圆形均匀扩散,竖向扩散速度大于横向扩散,并在竖向形成舌状的扩散峰;12 个月时,舌状扩散峰更显突出。说明 0~12 个月间,渗流作用很强,因为渗流作用造成的扩散是沿重力方向。但是经历 24 个月后,随铜离子的扩散,其浓度等值线

趋近水平,扩散峰消失,如图 6 (c) 所示;这可能是由于分子扩散的作用,由于受浓度梯度控制,分子扩散在各个方向基本是相同的速度,从而导致铜离子浓度有均匀化的趋势。8 m 深处,铜离子的浓度接近 0.5 mg/g,是中国天然土中铜离子含量的 25 倍。说明这个深度处的土壤已经被污染。

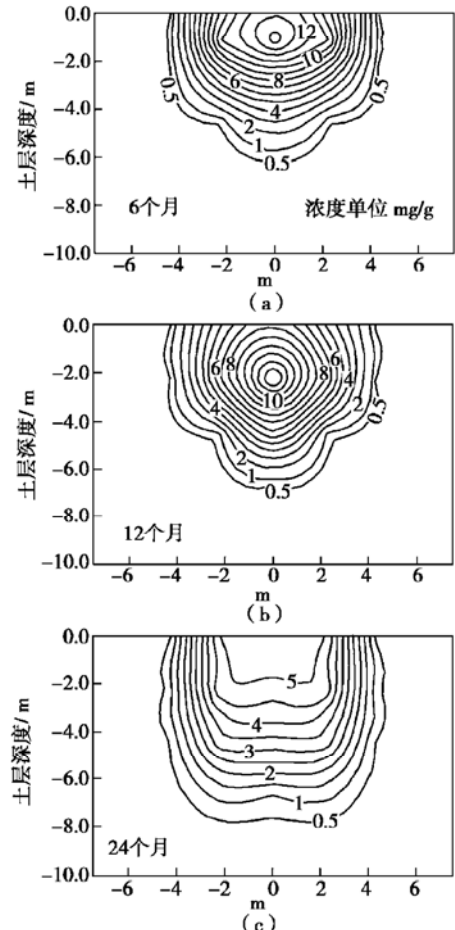


图 6 6、12 和 24 个月后土层中铜离子浓度 (mg/g) 等值线

Fig. 6 Isoline of concentration of copper ion (mg/g) in the soil at 6, 12 and 24 months

3.2 土壤干密度对铜离子扩散的影响

土的物理化学性质是影响污染物扩散的重要因素,固体废物填埋场设计中通常要求防渗土层干密度高,渗透性低。本文选取干密度为 1.60 g/cm³ 和 1.65 g/cm³ 进行模型土的制备,其他条件不变。离心机运转的原型时间均为 24 个月,观察土体中污染物的迁移过程和浓度分布。含水率测定表明,在地面 6 m 以下,较密实的土含水率降低 1%~3%,如表 2 所示。含水率的降低不仅可以降低土的渗透性,而且可以降低分子扩散的速度。

图 7 中显示出,干密度为 1.60 g/cm³ 的模型中铜扩散的深度比 1.65 g/cm³ 模型扩散的深度深 1 m。密度低的土中铜扩散的范围不论是横向还是竖向均明显增大,因此,两个模型的扩散特征在形状上也有明显

的差别。

表 2 不同深度土层含水率 (%)

Table 2 Water content of soil layers at different depths							
深度/m	0	-2	-4	-6	-8	-10	
干密度	1.60/(g·cm ⁻³)	3.93	5.80	6.15	9.25	11.75	13.29
度	1.65/(g·cm ⁻³)	4.67	4.81	7.17	8.31	9.43	10.16

3.3 讨论

离心模型可以较好地模拟非饱和土中的渗流过程，即原型和模型的渗流过程是相似的；离心机中分子扩散与渗流有着相同的模型比尺^[11]。

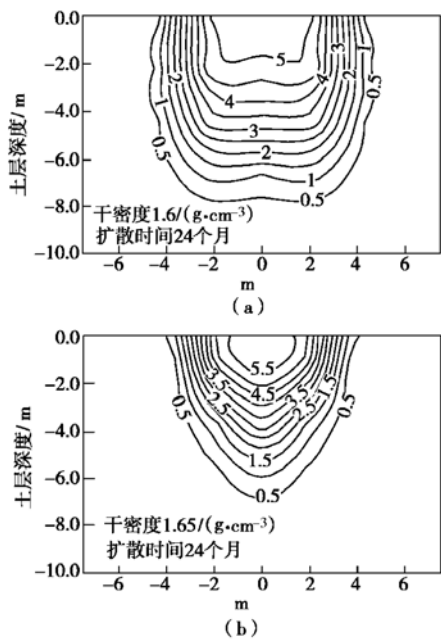


图 7 扩散 24 个月后土层中铜离子浓度等值线 (单位: mg/g)
Fig. 7 Isoline of copper ion concentration in the soil at 24 months

污染迁移初期水力梯度下作用下的渗流占有很大的优势。在本文介绍的试验条件下，渗流的作用大于分子扩散的作用，因为扩散时间为 6 个月时，如图 6，扩散深度已经达到 6 m，并形成竖向的扩散峰。在 12 个月时，扩散峰仍然存在，表明竖向的水力梯度造成的污染物扩散的时间可以达到 12 个月。分子扩散形成的扩散深度可能不到 1 m，它明显的特点是在横向和水平方向的浓度逐渐趋于均匀化。

土壤干密度的增加能够减少土中的孔隙，从而降低渗透系数，因此减缓可溶性离子向下的扩散。从而说明对天然或者人工防渗土层的压实是行之有效的污染物控制措施之一。

通过离心模型试验，可以在污染物长期扩散的规律性问题上提供一些定性的成果。而且应该看到，离心模型试验是目前物理模拟的最好手段，可用于分析在一定条件下，土壤的物理化学特性对污染物扩散的

定性地影响。

然而，离心模型试验也有局限性，它表现在：①吸附和化学反应在原型和模型中是不相似的，因为原型和模型中的吸附和化学反应速度是一样的，吸附和化学反应不能够在离心机中被加速。由于离心试验的时间较短，吸附在黏粒表面上的铜离子量比原型的偏少；更多的铜离子会随机械弥散（渗流）和分子扩散而被携带到更大范围的土体中，所以通过离心模型试验预测土体中可溶性铜离子的迁移过程时，铜离子污染的范围会比实际的偏大，远处区域的浓度比实际情况偏高。相应，在泄漏点处附存的铜离子浓度降低的速度偏快；②实际土壤中富含有机质，土壤中的腐殖酸和腐里酸等能与铜形成螯合物而固定铜，因此使更多的铜积蓄在土壤中，在离心模拟中不能考虑该因素。

4 结 论

通过干密度为 1.60 g/cm³ 的一组离心模型试验研究及分析可以得出如下结论：

- (1) 由于初始渗流作用，铜离子竖向扩散速度大于横向扩散速度，形成竖直向下舌状的扩散峰；经历 24 个月后，扩散峰消失，在 8 m 深处土壤中铜离子浓度等值线的趋近水平。
- (2) 在 8 m 深处，铜离子的浓度接近 0.5 mg/g，是中国天然土中铜离子含量的 25 倍。这个数值可能会比实际含量偏高，但是它定性地说明，铜离子会随下渗的水流而扩散，只是扩散的快慢与土壤的物理化学特性有密切关系。

(3) 通过不同干密度模型试验的研究，发现：土壤的干密度增加，铜离子的扩散速度明显减缓。干密度为 1.60 g/cm³ 的模型中铜扩散的深度比 1.65 g/cm³ 模型扩散的深度深 1 m。密度低的土中铜扩散的范围不论是横向还是竖向均明显增大。这说明进行防渗土层压实的必要性。

参考文献：

[1] Garnier. Proceedings of International Symposium on Physical Modeling and Testing in Environmental Geotechnics [C]. NECER (Network of European Centrifuges for Environmental Geotechnical Research), La Baule, France, 2000.

[2] Mitchell R J. The eleventh annual R. M. Hardy Kenote address, 1997: Centrifugation in geoenvironmental practice and education [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998. 35: 630-640.

[3] 陈湘生, 张建红, 胡黎明, 濮家骝. 土工离心模拟实验在环境岩

- 土工程中的应用现状报告(专题报告)[A].第一届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会[C].2002,11,杭州.122-131.
- [4] 胡黎明,劳敏慈,濮家骊,殷昆亭.LNPALs 在非饱和土中迁移的离心试验模拟[J].岩土工程学报,2002,24(6):690-694.
- [5] Zhang J H, Yan D. Accelerated migration of copper in unsaturated soil [A]. Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering [C]. 29~30 Oct. 2003, Beijing. 43-49.
- [6] Gurung S B, Almeida M S S, Bicalho K V. Migration of zinc through sedimentary soil models [A]. Proc Centrifuge 98, 1998 Balkema [C]. Rotterdam. 1998. 589-594.
- [7] Lo Irene M C, Zhang J H, Hu L M. Centrifuge study of cadmium migration in saturated soils [A]. International Conference on Physical Modeling in Geotechnics [C]. Newfoundland, Canada, July 10~12. 385-389.
- [8] Basford J, Goodings D J, Alba T. Fate and transport of lead through soil at 1 g and in the centrifuge [A]. International Conference on Physical Modeling in Geotechnics [C]. Newfoundland, Canada, July 10~12. 379-383.
- [9] 廖自基.环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M].北京:科学出版社,1989.
- [10] Pu J L, Liu F D, Li J K, Li S Q, Yin K T, Sun Y S, Jin P F. Development of medium-size geotechnical centrifuge at tsinghua university [A]. Proc of Int Conference Centrifuge 94 [C]. Singapore/31 Aug. 2 Sept., 1994. 53-56.
- [11] Cooke A B. Centrifuge modeling of flow and contaminant transport through partially saturated soils [D]. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada. 1991.
- [12] 李健,郑春江,等.环境背景值数据手册[M].北京:中国环境科学出版社,1989.

“中国力学学会学术大会 2005—岩土力学基本理论与工程应用研讨会”征文通知

为配合 2005 年 8 月 26~28 日在北京由中国力学学会举办的“中国力学学会学术大会 2005(CCTAM 2005)”,按照本次力学学术大会筹办方案,中国力学学会岩土力学专业委员会决定同步召开第七届岩土力学专业委员会换届后的首次学术会议。围绕岩土力学与岩土工程学科的发展战略,同时体现中国力学学会岩土力学专业委员会的自身特点,以岩土力学基础理论、实验技术与计算方法及其在岩土工程中的应用为主题,组织岩土力学基本理论与工程应用研讨会。

本次会议将通过特邀报告、专题报告与小型专题研讨等多种形式,就以下四个专题进行广泛的学术交流,以加强相关专业或学科之间的相互借鉴和交叉融合,促进学科发展和学术进步:①岩土力学基本理论及实验测试技术;②岩土力学分析理论与数值计算方法及其应用;③地质灾害与环境岩土工程;④大型工程建设中的岩土力学问题。

欢迎广大岩土力学与岩土工程界及相关专业的研究人员、教师、学生踊跃投稿,于 2005 年 4 月 1 日前递送 1 页以内摘

要一式两份,并注明论文的联系作者(姓名、通讯地址、电话、传真、E-mail 等联络方式),岩土力学专业委员会将在组织集中审稿后将录用的论文或摘要推荐给学术大会汇集成册,正式出版。岩土力学基本理论与工程应用研讨会将评选大会优秀论文和学生优秀论文,并在大会上颁奖。

本届会议特别欢迎青年学者和研究生参加,会上将举办青年学术沙龙,为青年学子提供一定学术讨论的自由空间,届时还将对学生在注册费上给予一定的优惠。

联系人:孔令伟、余诗刚;联系电话:027-87197521、87199250;传真:027-87197386;电子信箱:lwkong@whrsm.ac.cn;网址:<http://www.cstam.org.cn/CCTAM>;联系地址:武汉武昌小洪山 中国科学院武汉岩土力学研究所;邮政编码:430071。

(中国力学学会岩土力学专业委员会 供稿)