

重金属离子和 LNAPLs 在非饱和土中的运移规律研究

张建红, 胡黎明

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 以重金属和轻非水相流体(LNAPLs)为例, 介绍了清华大学开展非饱和土中污染物运移规律研究的部分工作成果。利用土工离心机对污染物的运移过程模拟, 取样得到污染物的浓度分布特征。同时采用数值分析手段对污染物的长期运移规律和其影响因素进行分析。研究表明: 离心模型试验可以有效模拟污染物的运移过程, 离心模型试验和数值分析相结合, 是研究污染物在非饱和土中运移规律的有效手段。

关键词: 环境岩土工程; 土工离心模型试验; 重金属; LNAPLs; 非饱和土

中图分类号: X505

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0277-04

作者简介: 张建红(1967-), 女, 河南信阳人, 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海洋土力学方面的研究工作。

Migration behavior of heavy metal and LNAPLs in unsaturated soils

ZHANG Jian-hong, HU Li-ming

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

Abstract: The transport behavior of contaminant in a subsurface system is an important research area in geoenvironmental engineering. Research work at Tsinghua University about heavy metal and LNAPLs migration was briefly introduced. Geotechnical centrifuge technique was used to model the contaminant process in unsaturated soils, and tempo-spatial concentration distribution were obtained by chemical analysis of collected soil samples. In addition, numerical simulation was employed to investigate the long term migration behavior and its affecting factors. It was shown that centrifuge could be use to simulate the transport process of contaminants, and the combination of centrifuge modeling and numerical simulation was an effective mean to study contaminant transport behavior in unsaturated soil.

Key words: geo-environmental engineering; geotechnical centrifuge model test; heavy metals; LNAPLs; unsaturated soil

1 非饱和土中的污染问题

每年全世界在生活和生产中产生了大量废弃物, 它们大致可分为 4 类: 城市垃圾, 主要是生活垃圾, 包括各种废纸、有机物、玻璃、金属、塑料等; 工业废料, 主要包括废钢渣、矿渣、粉煤灰、废油、废塑料、废酸、废碱以及核废料等; 建筑废料, 主要包括开挖余土、废淤泥、废混凝土、废沥青、废木料等; 以及农业废物如农用杀虫剂、化肥和农药等。

废弃物中包含了种类繁多、数量庞大的, 无机和有机的有毒有害物质。由于这些废弃物主要倾倒或者堆填在非饱和土层, 其中的污染物随气体和水流的运移在非饱和土中扩散, 那些进入生物圈循环的有毒有害物质将对自然环境和生物产生极大的威胁。

因此关注非饱和土中有毒有害物质的扩散, 开展相关研究对土壤污染防治、实施环境保护具有重要意义。国内学术界在这一研究领域从多角度、多学科出发已经进行了大量的工作。限于作者学识, 很难系统

总结已有的成果。本文仅限于讨论清华大学开展的以重金属和石油产品为代表的污染物在非饱和土中的扩散问题研究。

重金属是环境中一种作用较为持久的污染物, 人类的生活和生产活动是造成重金属污染的主要原因。由于它毒性大、难降解, 对人和其他生物有很大危害, 因此其在土体和地下水中的流动性倍受关注。金属矿产开采、工业产品制造的排放物、城市垃圾填埋场以及农药和化肥的施用都是造成重金属污染的来源。我国每年都有相当数量的重金属通过工业废水、废气以及城市固体废弃物的形式排放进入生态系统, 而这其中的绝大部分都是经过土壤介质和地下水系统传递的。土壤环境不仅是重金属污染物迁移的媒介, 同时也是它们发挥效应的主要场所。研究重金属污染物与

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50109003、50209006); 欧盟亚洲联系项目(CN/ASIA-LINK/010 94556)

收稿日期: 2005-07-14

土壤介质相互作用的迁移规律,对污染的预测和控制是非常有意义的。但目前在这方面的研究成果还较少。

石油产品是导致土壤污染的最重要的有机污染物之一。它的泄漏与污染较为普遍,而其在非饱和土中的迁移是一个非常复杂的过程。LNAPLs 在地表面泄漏时,首先由于重力的作用进入非饱和土层的土-水-气三相系统,同时在土体中弥散和被土颗粒表面吸附;在毛细力的作用下,部分 LNAPLs 会残留在土体孔隙中;当达到地下水系统时,会浮在地下水表面,并随着地下水的流动而继续迁移,部分可溶性组分在水体中溶解和扩散。由于 LNAPLs 常在非饱和土中迁移,其迁移规律涉及到多组分、多相流问题,污染特征非常复杂,而非饱和土问题也是岩土工程中的研究前沿,因而 LNAPLs 在非饱和土中的运移特性成为当今环境岩土工程研究的热门和难点课题。

目前,国内外通过物理模拟和数值预测的方法开展了大量的非饱和土中污染物扩散问题的研究。

物理模拟包括小比尺的土柱试验、离心模型试验和大规模现场试验。室内土柱试验比较简单易行,较普遍采用,取得了不少成果。但是土柱试验不能模拟实际土体的重力效应和边界条件,在进行污染物长期迁移观测方面有较大局限性。土工离心模型试验从 1988 年^[1]开始用于环境岩土工程的研究,它可以在小比尺模型中模拟现场土体的应力场,准确控制水文地质条件和边界条件,较好地再现原型特性,为理论和数值分析方法提供真实可靠的参数依据^[2,3]。根据相似率,试验模拟时间可以大大缩短,从而使污染物长期扩散问题的研究成为可能。现场试验可以得到较为准确的量测数据,但是由于历时较长,受外界因素影响较大,因此费用特别昂贵,不能普遍采用^[3]。

由于多相流和非饱和土问题的复杂性使得理论研究比较困难;数值方法成本较低,能够模拟多种复杂边界条件和不同历时问题,目前国内外学者有大量的成果发表^[4,5]。但数值模型必须通过试验获得准确的模型参数以及大量数据检测和校正各类数学模型。非饱和土中的水、气和污染物质的迁移规律涉及到多组分、多相流问题,污染特征非常复杂,而非饱和土问题是岩土工程中的研究前沿和难点课题。因此污染物在非饱和土中运移规律的研究是一项艰巨而有意义的课题。

2 清华大学关于污染物运移问题研究

2.1 重金属的扩散

重金属在土体中的迁移主要受到对流、弥散、吸附等作用的控制,很难降解。利用清华大学土工离心

机,以铜离子作为代表污染物,研究了静止地下水位以上 15 m 厚的三种非饱和粘性土($I_p=8.7\sim 10.7$)中铜离子的扩散规律,具体结果见文献[6~9],研究表明铜离子在这类粘性土中的扩散大致有以下特征:扩散初期(0.5~1 a)渗流作用显著,铜离子主要随渗流(对流)产生扩散,土体中有倒三角形的舌状扩散峰;随着时间推移,渗流作用不再明显,但是铜离子仍然在竖向和横向发生迁移,扩散峰的形状发生改变,变成圆滑的舌状扩散峰,扩散范围增加;2 a 或 3 a 年后扩散峰逐渐消失,扩散端等值线趋近水平,铜离子在土体中的浓度趋于均匀化。

土体密实程度对铜离子扩散特征有明显的影响。随着土体密实程度增大,其孔隙比减小,孔隙通道可能因此狭窄,甚至有些孔隙通道因此闭锁,从而降低土体的渗透性。因此土体密实度增大时,铜离子的扩散速度有较为明显的降低,同时间的扩散范围减小。这是进行固体废物填埋场的人工防渗层设计时,要求防渗层粘性土具有一定的压实性的依据。

铜离子在非饱和土中的扩散速度因土而异,粘粒含量较低的土迁移较快。粘粒含量对铜离子的阻碍非常迅速而且有效。其可能的物理原因有:粘粒含量增加,结合水膜变厚,使得土体中孔隙减小和自由水减少,从而显著降低了水的流动性和土的渗透性;其可能的化学原因:粘土颗粒与土有物理和化学的吸附及其他化学反应。试验观察的现象中两种原因都可能存在。

土壤中化学环境对污染物迁移的影响也是非常显著的,有时候要远大于土壤压实程度甚至粘粒含量的影响。影响较明显的化学性质有:①pH 值, pH 值过低会增加土壤中重金属离子的迁移能力,同时降低其螯合能力, pH 值过高会导致生产沉淀,使重金属离子更多地以固相存在;②可溶盐离子的存在也会影响土壤中胶体的性质,还会形成吸附竞争,最终影响土壤对污染物中的重金属离子的吸附能力。需要说明的是化学反应在离心机中不满足相似规律,因此,要求试验时间充分长以减小比尺效应。

从罗泽娇等^[10]对武汉某固体废物填埋场的研究,并与本文的试验结果对比,可知土体中的水环境对重金属的迁移有着非常重要的影响。如果土体中地下水丰富,水位浅,地面入渗水量充沛,重金属可能通过对流、弥散等多种方式在土体中迁移,迁移深度可以从 8~25 m。其浓度沿深度方向最终趋于均匀分布。在迁移途径中,重金属会被土体中存在的粘土颗粒吸附,或形成螯合物附存下来。

2.2 LNAPLs 的运移

LNAPLs 在土体中的迁移主要受到对流、弥散、

吸附、降解等作用控制,是多孔介质中的多相流问题。清华大学采用离心模型试验模拟了 LNAPL 在非饱和土体和地下水系统中的迁移过程,并采用有限元数值分析手段研究了污染物长期运移规律和影响其运移特征的主要因素^[11~17]。

(1) 数值模拟

针对以乙苯为代表的 LNAPL 在非饱和英国标准砂中运移问题进行了有限元数值模拟分析,研究其运移特征和影响因素。计算模型为地下水位深度为 18.75 m,乙苯在土层表面作为点源泄漏,分别考虑地下水静止和匀速流动两种水文条件。具体参数和计算结果见相关文献,这里列出通过数值分析得到的结论。

乙苯首先在重力作用下向下运移,同时由于毛细压力的作用也使其产生部分横向扩散。由于重力的作用效果比较明显,因而形成了一个以泄漏体为核心的作用带。由于非饱和区域土体固有渗透系数相对较低,因此乙苯运移 1 a 之后仍没能到达毛细饱和区。乙苯在非饱和区向下运移 2 a 之后污染锋面到达地下水位上方 1 m 处并发生了一定程度的累积现象,这说明随着运移时间的增加乙苯自由相到达了毛细升高边界。

乙苯在非饱和区向下运移 3 a 之后随时间的推移在毛细升高边界产生明显累积现象,使得局部饱和度增高,同时沿毛细升高边界横向扩散,使得污染范围扩大。在地下水中,当乙苯泄漏 1~2 a 后,部分可溶性乙苯溶入水体在毛细饱和区形成一个溶解相浓度中心,只是浓度相对较低。随着运移时间增加,乙苯在水中逐渐向深层扩展,伴有明显的横向扩散,使得地下水和毛细升高区域内的水体污染范围增大。

地下水性质对毛细区以上的非饱和土中污染物运移规律影响不是很明显,但对毛细饱和区和地下水中的分布特征有显著的影响。由于地下水的运动,飘浮在饱和区之上的污染物自由相随之移动,因此污染产生明显的横向运移,使得最终污染范围扩大;同时由于地下水的运动使得水动力弥散作用加强,污染物在水中的溶解相污染范围显著加大。

数值计算程序可以模拟非饱和区 LNAPLs 在土体和地下水中的运移过程,并可以预测 LNAPLs 的长期运移趋势。数值分析结果还有待于现场试验和模型试验的验证。

(2) 离心模型试验研究

采用 75 g 离心模型试验研究 LNAPL 在非饱和土中的迁移特征。采用英国标准砂作为非饱和土模型,苯、甲苯、乙苯和邻二甲苯(BTEX)混合物作为 LNAPL 污染物。试验中将 BTEX 泄漏在土层表面,并分别模拟静止和流动地下水位两种条件。试验结果表明:地

下水位静止的情况下 BTEX 在非饱和区主要向下运移。由于非饱和区细砂渗透系数很小,BTEX 在非饱和土中迁移是一个长期过程。大部分污染物迁移 1 a 后仍分布在地下水位上方 13 m 处,5 a 后浓度最大值下移到地下水位上方 8~9 m 处。由于土壤中毛细升高的影响,污染物在毛细饱和区上方横向扩散,使土壤污染的范围增大。5 a 的横向扩散范围明显比 1 a 的大,同时土壤中的 BTEX 浓度比 1 a 的有所降低。

地下水流动对污染物的迁移特征有一定影响。由于地下水位的流动使得污染物顺水迁移,导致污染物横向污染范围扩大,下游污染物浓度有所增大,而上游略有降低。

试验结果表明, LNAPLs 在非饱和土和地下水体中的迁移是一个长期的过程。BTEX 渗漏后会通过非饱和土层向下运移,到达地下水位后在地下水位之上形成高浓度区,同时会沿地下水面侧向迁移,部分可溶性物质会在一定程度继续向下迁移。地下水的流动对 BTEX 的迁移特征有一定影响。离心模型试验得到的 LNAPL 迁移规律与数值分析结果相似。离心模型试验和数值分析相结合是研究环境岩土工程问题的重要手段。

3 结论与展望

物理模拟和数值分析结合是进行非饱和土中污染物运移问题研究的有效手段。目前,物理模拟和数值分析各有局限性。以离心模型试验为例,在物理化学相似比尺方面还需要更多的工作,以充分把握试验手段的可行性、局限性以及数据的合理性。

为了有效地进行污染预测,需要所提出的数学模型能够把握污染物运移的控制因素和主要规律性,采用的参数能够基本反映土体和污染物的物理化学特性,从而准确把握污染物在非饱和土中的扩散规律。

参考文献:

- [1] ARULANANDAN K, THOMPSON P Y, KUTTER B L, et al. Centrifuge modeling of transport processes for pollutants in soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1988, 114(2): 185 - 205.
- [2] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[J]. Blackie Academic & Professional 1995.
- [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[C]//第一届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会. 杭州, 2002. (CHEN X S, ZHANG J H, HU L M, PU J L. Centrifuge modeling in geoenvironmental engineering [C]// The First National

- Conference on Geoenvironmental Engineering and Geotextile Technology. 2002.)
- [4] HELLAWELL E E, SAVVIDOU C. A study of contaminant transport involving density driven flow and hydrodynamic cleanup[C]// Centrifuge 94. Rotterdam, 1994, 357 - 362.
- [5] PINDER G F, Abriola. On the simulation of non-aqueous phase organic compounds in the subsurface[J]. Water Resource Res, 1986, **22**(9): 109 - 119.
- [6] PARKER J C, LENHARD R J, KUPPUSAMY T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media[J]. Water Resour Res, 1987, **23**(4), 618 - 624.
- [7] 张建红, 严冬. 非饱和粉质砂土中铜离子迁移的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 792 - 796. (ZHANG J H, YAN D. Centrifuge modeling of copper migration in unsaturated silty clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 792 - 796.)
- [8] ZHANG J H, YAN D. Accelerated migration of copper in unsaturated soil[C]// Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering. Beijing, 2003.
- [9] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 622 - 625. (ZHANG J H, LO I M C, HU L M. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 622 - 625.)
- [10] 罗泽娇, 赵俊英, 靳孟贵. 武汉市某垃圾填埋场重金属对环境污染的研究[J]. 地质科学情报, 2003, **22**(3): 87 - 90. (LUO Z J, ZHAO, J Y, JIN M G. Contamination of heavy metals in a landfill in Wuhan[J]. Geological Science News, 2003, **22**(3): 87 - 90.)
- [11] LO Irene M C, HU L M, MEEGODA, N J. Study of LNAPLs migration in unsaturated soils using geotechnical centrifuge[J]. Soil and Sediment Contamination, AHA, 2005, **14**(1): 85 - 103.
- [12] LO M C, HU L M. Long-term migration of light nonaqueous-phase liquids in two unsaturated soils: Clayey silt and fine sand. practice periodical of hazardous[J]. Toxic, and Radioactive Waste Management, 2004, **8**(4): 228 - 237.
- [13] LO M C, HU L M. Centrifuge modeling of LNAPLs transport in unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, **130**(5): 535 - 539.
- [14] HU Li-ming, HAO Rong-fu, XING Wei-wei, LO Irene M C, CHENG Xiang-sheng. Centrifuge modeling of soil contamination and remediation technology[C]// International Conference on Geotechnical Engineering. 2004.
- [15] 郝荣福, 胡黎明, 邢巍巍. 土壤中可挥发性污染物清除的离心试验研究[J]. 岩土力学, **25**(7): 1037 - 1040. (HAO R F, HU L M, XING W W. Centrifuge modeling of removing volatile contaminants in soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1037 - 1040.)
- [16] 胡黎明, 郝荣福, 殷昆亭, 劳敏慈. BTEX 在非饱和土和地下水系统中迁移的试验研究[J]. 清华大学学报, 2003, **43**(11): 1546 - 1549. (HU L M, HAO R F, YIN K T, LO I M C. Experimental study of BTEX transport in an unsaturated soil and groundwater system [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, **43**(11): 1546 - 1549.)
- [17] 胡黎明, 濮家骊, 劳敏慈, 殷昆亭. LNAPLs 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. (HU L M, PU J L, LO I M C, YIN K T. Centrifuge modeling of LNAPLs migration in unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 690 - 694.)