

污染土壤高压旋喷修复药剂迁移影响因素的透明土试验

武亚军¹, 韩亚东¹, 唐欣¹, 陈敏², 陈天慧²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海市岩土工程检测中心, 上海 200444)

摘要: 基于透明土材料和Matlab图像处理技术,开展了高压旋喷修复药剂迁移透明土模型试验研究,实现了非嵌入式可视化地获得药剂的迁移过程。通过开展不同渗透压力差、粒径分布、孔隙比等情况下的药剂迁移试验,探究了不同因素下的迁移特性,并从药剂迁移速率和分布面积两方面进行了对比分析。结果表明:药剂迁移速率随大粒径颗粒含量、孔隙比、渗透压力差的减小而降低,并呈二次函数关系;药剂分布面积随时间不断增大,发展阶段可分为快速增长阶段和缓慢增长阶段。

关键词: 药剂迁移;高压旋喷法;透明土技术;分布面积;迁移速率

中图分类号: X53

文献标志码: A

Transparent Soil Test on Factors Affecting Transport of High-pressure Jet Remediation Agents in Contaminated Soil

WU Yajun¹, HAN Yadong¹, TANG Xin¹, CHEN Min², CHEN Tianhui²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Geotechnical Engineering Detecting Center, Shanghai 200444, China)

Abstract: By using the transparent soil materials and the Matlab image processing technology, a model experiment of high-pressure jet remediation agent transport in transparent soil was done to obtain the migration process of agents visually and non-intrusively. For studying the migration characteristics under the different void ratios, particle size distributions, and osmotic pressure differences, the model tests were conducted and the comparison of migration rate and distribution area was made. The results show that the migration rate decreases

with the decrease of large particle size content, void ratio and osmotic pressure difference, and there is a similar quadratic function relationship between the factors and migration rate; the distribution area of agents enlarges with time elapsed, and the period of agent migration can be divided into two stages, i. e. rapid growth stage and slow growth stage.

Key words: agent transport; high-pressure jet injection method; transparent soil technology; distribution area; transport rate

近年来,我国土壤污染问题日益严重,人类的生存与发展受到严重威胁。全国土壤污染总超标率已达16.1%^[1],对土壤污染进行防治及修复工作刻不容缓。依据注药方式不同,常用的原位修复技术分为直压式注药法、注射井法和高压旋喷注药法等^[2]。其中,高压旋喷注药法以适用土层范围广、成本低、修复深度大、施工效率高等突出优点,近年来被广泛应用于污染土壤的修复。然而,目前对于修复药剂的迁移扩散规律尚不明确,因此针对修复药剂迁移特性的分析是非常有必要的。

随着高压旋喷注药法的广泛应用,国内外一些学者进行了相应的研究。刘松玉^[3]、唐小龙等^[4]的研究表明,高压旋喷注药法对土壤结构扰动剧烈,适用于渗透性较小的黏性土壤。高压旋喷注药技术应用于上海黏性较高的污染土壤时,可弥补传统注药方式存在的治理周期长、修复效果不理想等缺点^[5]。由于修复药剂也相当于一种溶质,因此借鉴污染物的研究方法对修复药剂的迁移规律进行研究。Guerrero等^[6]研究污染物在多孔介质中的扩散问题,并求得空间上的一维线性变系数对流扩散方程的解

收稿日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(41772303); 上海市自然科学基金(17ZR1410100)

第一作者: 武亚军(1973—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为地基处理、废弃泥处理、污染土壤修复。E-mail: wyjdldz@163.com



析解。郑顺安等^[7]研究了铅、镉、铜、汞在七种典型农田土壤中的吸附解吸、迁移积累等特性,结果表明土壤对Cu的吸附性能是决定其迁移性能的重要因素。王亚平等^[8]开展了等温条件下土柱淋滤试验,得到铬、铅、汞三种重金属离子在土壤中的穿透能力表现为 $\text{Hg}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$,三种不同质地的土壤对离子迁移的能力都表现为大同土壤>临汾土壤>太原土壤。Fox等^[9]等的研究认为,扩散和固结引起的对流作用对溶质迁移有重要影响。林青等^[10]用耦合Freundlich吸附的单点模型(OSM)模拟了镉在粉壤、壤砂中的迁移过程,结果表明不同土壤对镉运移的阻滞能力不同。商建英^[11]用Freundlich方程、对流-弥散方程、确定性模型对镉在土中的迁移吸附进行了数值模拟,探讨了pH值和有机质的影响。然而,常规的迁移模型试验,只能得到有限的离散点浓度,获取的数据不连续,并且取样过程中对土样产生扰动。因此,寻求一种更加直观的、非侵入式的研究手段显得尤为重要。

随着透明土材料和图像处理技术的发展,采用物理力学性质与天然土体相近的透明材料来模拟天然土,开展土体内部可视化模型试验研究逐渐成为一种趋势^[12]。Iskander等^[13]、Liu等^[14]、宫全美等^[15]采用无定形二氧化硅和与其折射率相匹配的孔隙液体制配出透明土,发现其岩土工程性质与黏土相似。White等^[16]将粒子图像测速法(PIV)运用在半模桩沉桩效应的半模试验上,测定了沉桩过程的位移场。孔钢强等^[17]开展了透明土材料电渗模型试验,探讨了孔隙流体种类对透明土内部渗流场的影响规律。Lo等^[18]应用三种不同类型的水族珠及染色流体,实现了观察多相流动输送过程的可行性。姜海波等^[19]利用二氧化硅和白油溶液配置的透明软黏土,研究了土桩形成机理。牟天瑜等^[20]的研究表明,通过浓度-灰度的相互转换,数字图像处理技术能够较准确地反映污染物迁移情况。

将透明土材料应用于污染土修复药剂迁移的模型试验,结合Matlab图像处理技术,探寻一种简便性、无损性的药剂迁移规律研究方法,并初步探究药剂迁移的影响因素。

1 试验材料及其物理力学指标

试验选用无定形硅粉作为透明黏土骨料,矿物油溶液(白油和正十二烷)作为孔隙流体。试验材料如图1所示。红色油溶性染料(易溶于油,化学性质

稳定)作为示踪剂。

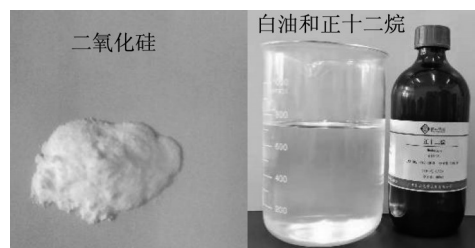


图1 试验材料

Fig. 1 Experiment materials

1.1 光学透明性分析

透明土的透明性是影响模型试验的重要因素。当孔隙液体和硅粉折射率相同时,试样的透明度最高。采用BM-2WAJ型阿贝折射仪测定孔隙液体的折射率,在室温下基于Black等^[21]提出的调制解调函数(MTF)测定不同折射率下透明土的透明度,计算式如下所示:

$$\alpha_{\text{MTF}} = \frac{(I_{\text{max}(I)} - I_{\text{min}(I)}) / (I_{\text{max}(I)} + I_{\text{min}(I)})}{(I_{\text{max}(O)} - I_{\text{min}(O)}) / (I_{\text{max}(O)} + I_{\text{min}(O)})} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{max}(I)}$ 、 $I_{\text{min}(I)}$ 分别为透明土试样中像素强度的最大值和最小值; $I_{\text{max}(O)}$ 、 $I_{\text{min}(O)}$ 分别为空气中像素强度的最大值和最小值。 α_{MTF} 越接近1,表示试样的透明性越好。透明土的光学透明性如图2所示。测试结果表明,当折射率为1.448时透明度最好,在该折射率下更有利于观察示踪剂的迁移情况,因此选用1.448折射率下的透明土试样进行下一阶段试验。

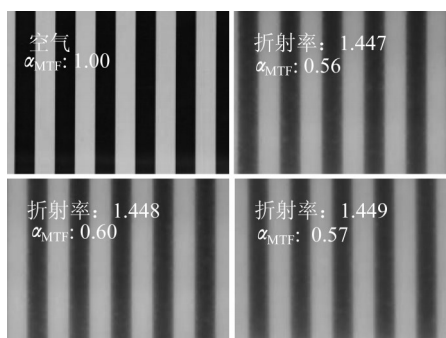


图2 光学透明性比较

Fig. 2 Comparison of transparency

1.2 颗粒分析特性

选择不同粒径硅粉颗粒配置的透明土试样进行颗粒分析试验,并同上海闵行区②₁层黏土^[22]比较,颗粒分析试验曲线如图3所示。结果表明,级配1试样以黏粒为主,含量达到58.2%,级配2、级配3试样以粉粒为主,粉粒含量均超过50%,分别达到

62.5%、65.8%。其中,级配2试样与上海②₁层黏土在颗粒粒径方面最为相近,也表明所配制的透明土在粒径级配方面具备模拟黏性土的可行性。因此,选择级配2试样研究不同孔隙比、不同渗透压力差边界条件下的示踪剂迁移情况。

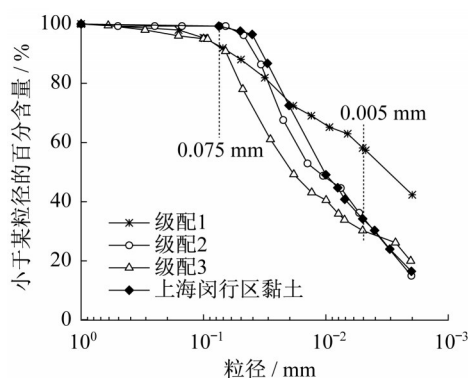


图3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of particles

1.3 固结压缩特性

对上述三种级配试样进行固结试验,探究透明土的压缩特性,得到透明试样的孔隙比 e 随固结压力 p 的变化曲线,如图4所示。结果表明, $e-\lg p$ 压缩曲线与常规黏性土相似,近似为线性关系。级配1试样初始孔隙比明显大于级配2、级配3试样,在相同固结压力下,级配1试样孔隙比变化范围最大。通过曲线计算相应压缩性指标,如表1所示。三种级配试样的压缩系数分布在 $0.6\sim 1.8\text{ MPa}^{-1}$ 范围内,均属高压缩性“土”。

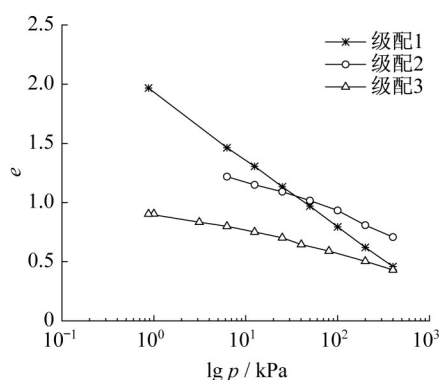


图4 透明土的 $e-\lg p$ 曲线

Fig. 4 $e-\lg p$ curves of transparent soil

表1 物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical parameters

土样类型	比重	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/ MPa
级配1	2.00	1.73	1.04
级配2	1.98	1.25	1.81
级配3	2.01	0.68	2.11

1.4 渗透特性

土体渗透性对溶质迁移有较大影响。利用渗透仪进行透明土样的渗透试验,探究三种级配试样在不同孔隙比下渗透性的变化。渗透系数 k 随孔隙比 e 的变化曲线如图5所示。结果表明,三种级配试样的 $e-\lg k$ 发展趋势相似,渗透系数 k 均随孔隙比 e 减小而减小,呈明显的线性关系,并且在坐标系中离散性较小。在相同孔隙比下,级配1试样渗透系数最低,其次为级配2试样。这是因为级配1试样细颗粒含量较高,即黏粒含量增高,渗透系数有降低的趋势。级配3试样大颗粒含量较多,因而渗透性相对较高。透明土渗透系数在 $10^{-4}\sim 10^{-7}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化,同淄博原状黏土^[23] ($10^{-4}\sim 10^{-6}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)相比渗透系数相差不大,可以用来模拟溶质迁移过程。

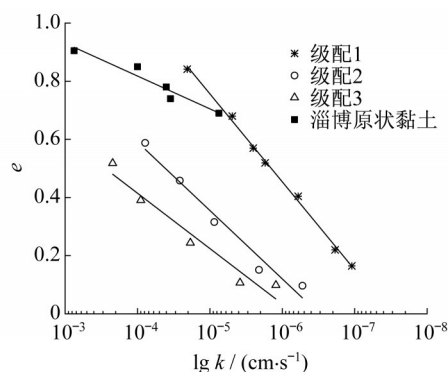


图5 渗透系数随孔隙比变化

Fig. 5 Variation of permeability coefficient with void ratio

由上述可知,尽管透明土的固结性质与天然黏土存在较大差异,但考虑到本试验探究修复药剂的迁移规律,利用透明土粒径和渗透性质与天然黏性土相似的特性,对药剂迁移规律进行定性研究是可行的。

2 修复药剂迁移模型试验

应用透明土材料探究修复药剂在饱和黏性土中的迁移规律,试验包含两部分内容:浓度-灰度标定试验和不同边界条件下示踪剂迁移试验。选取不同渗透压力差、不同颗粒级配、不同孔隙比等边界条件,进行示踪剂迁移试验。

2.1 试样制备

透明土试样制备主要包括试样准备、试样压制、真空饱和三个步骤。称量所需的粒径下的二氧化硅颗粒放入烧杯中,用玻璃棒充分搅拌直至均匀,

并将拌均匀的硅粉颗粒放入迁移装置;将装好试样的迁移装置放入制样器内,置于液压千斤顶下压制,得到所需的干试样;将压制好的试样置于装有折射率为1.448混合油溶液的真空饱和装置中真空饱和,饱和过程一般需要历时8~12 h。

2.2 迁移试验装置

试验中所用仪器与设备主要包括马氏瓶、数码相机、迁移装置、背景灯、计算机等,模型试验装置如图6a和6b所示。马氏瓶提供稳定“水头”,通过改变高度可控制不同的渗透压力差。通过背景灯获得均匀稳定的光源,试样拍摄时关闭窗帘,减小其他光源的干扰。示踪剂迁移过程由佳能60D相机记录,通过计算机控制相机可获得示踪剂迁移过程中的一系列图像。渗透装置中放置透明土样的土样盒由有机玻璃制成,可制得高40 mm、直径62 mm的透明土试样。

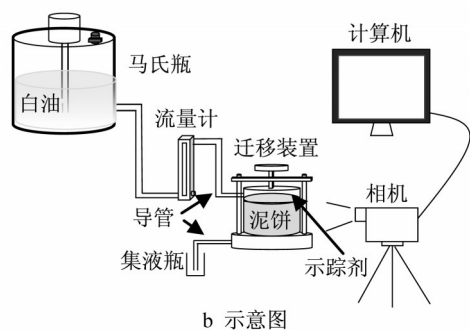
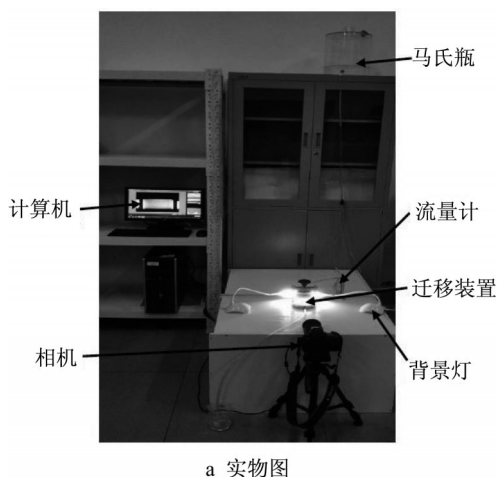


图6 模型试验装置

Fig. 6 Model test devices

取1 000 mg红色油溶性染料置于1 L孔隙溶液中,充分搅拌配制1 000 mg·L⁻¹的示踪剂溶液。透明土试样制备好后,把经过示踪剂溶液浸泡过的滤纸置于试样顶部,可使示踪剂均匀覆盖于试样顶部。

2.3 浓度场的测量与标定

将压制好的试样放入配置好的已知浓度(选取0、30、70、100、300、700、1 000 mg·L⁻¹)的示踪剂溶液内真空饱和,得到不同浓度下的饱和试样。试样取出后,通过数码相机拍摄不同浓度下试样的图像,借助Matlab软件平台对采集到的浓度图去噪声,进行灰度化处理。浓度越大,颜色越深,与之对应的灰度值越小。相应的浓度-灰度关系曲线如图7所示。

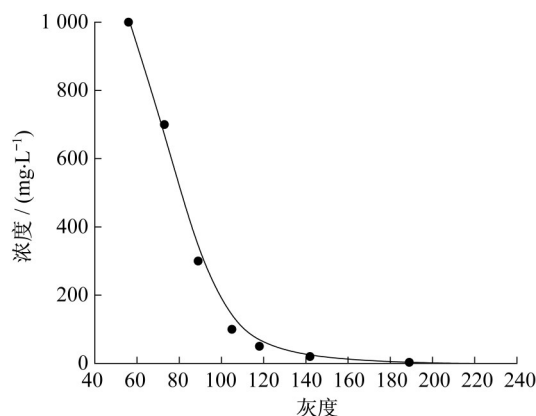


图7 浓度-灰度关系

Fig. 7 Relationship between concentration and gray

绘制出灰度和浓度散点图后,得到拟合曲线对应的浓度-灰度公式,如下所示:

$$C = \frac{1\,050\,000\,000\,000\,000}{G^{6.87} + 9\,390\,000\,000\,000} - 0.8 \quad (2)$$

式中:G表示图像的灰度值;C表示浓度值。

3 试验结果与分析

依照上述步骤制得饱和透明土试样,进行不同边界条件下示踪剂迁移试验。通过数码相机得到不同边界条件下示踪剂迁移过程中的一系列图像,然后采用Matlab软件图像处理技术进行处理,可获得不同边界条件、不同时刻的浓度等值线图。提取迁移过程中示踪剂底部平均位移,可得到示踪剂位移与时间关系曲线;提取不同时刻示踪剂覆盖面积,可得到示踪剂分布面积与时间关系曲线。

3.1 不同渗透压力差下示踪剂迁移

进行“水头”高度为1.0、1.5、2.0 m下的示踪剂迁移试验,对应的渗透压力差分别为7.5、11.3、15.0 kPa。对Matlab图像处理得到的不同时刻示踪剂浓度等值线图进行分析,示踪剂的位移以示踪剂覆盖区域最底部点的纵坐标为准,为减小误差,选取

竖向间隔相同10个点的平均值绘制位移曲线,如图8所示。从图8可以看出,渗透压力差为15.0 kPa时,迁移速率最快。随着顶部“水头”压力的减小,示踪剂的迁移速率也随之减小,示踪剂迁移方式呈现为整体下沉式迁移。三种压力边界条件下示踪剂位移曲线均为二次函数,随着时间的增长迁移距离也不断增长,但迁移速率呈减缓的趋势。

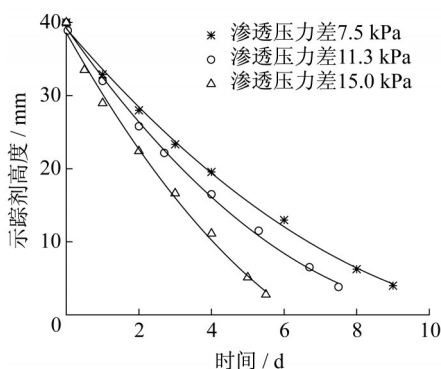


图8 不同渗透压力差下示踪剂位移

Fig. 8 Tracer transport at different osmotic pressure differences

图9为不同渗透压力差下示踪剂分布面积。从图9可以看出,分布面积曲线可划分为两个阶段。第一阶段为快速增长阶段,从示踪剂开始迁移至离开“土层”表面,表现为分布面积快速增长,此阶段示踪剂在较短时间内达到最终分布面积的60%以上;第二阶段为平稳增长阶段,主要是示踪剂在土层内部的迁移,表现为分布面积缓慢增长,增长速率逐渐降低,这一阶段示踪剂迁移以对流为主要影响因素,最终随着渗透压力差的增大,分布面积也随之增大。这主要是由于渗透压力差越大,土体内部的对流越强,示踪剂分布区域越广。

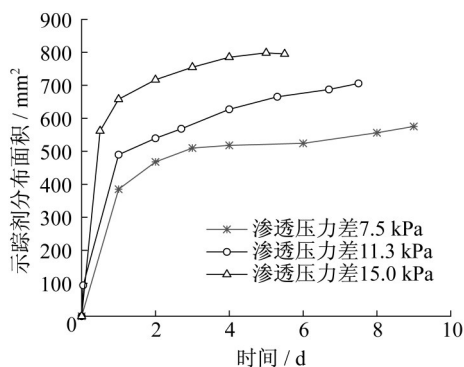


图9 不同渗透压力差下示踪剂分布面积

Fig. 9 Tracer distribution area at different osmotic pressure differences

3.2 不同粒径级配下示踪剂迁移

选取上述三种粒径级配进行示踪剂迁移试验,图10为三种级配下示踪剂位移图。可以看出,级配3试样迁移速率最快,级配1试样最慢。这是由于级配1试样以黏粒为主,对流效应明显弱于级配2试样和级配3试样。虽然级配2和级配3试样在粒径级配上相差不大,但是在示踪剂迁移速率上表现出较大差异,级配3试样的迁移速率约为级配2试样的1.7倍。这是由于级配3试样含有较多的大颗粒,使得在相同孔隙比下级配3试样的对流效应大于级配2试样。图11为不同粒径级配下示踪剂分布面积。由图11可以看出,级配3试样示踪剂分布面积最大,级配1试样最小。这是因为大粒径颗粒含量越多,渗透性越好,在示踪剂迁移过程中溶质受到的阻碍作用越小,分布面积就越大。三种级配下,示踪剂分布面积在快速增长和缓慢增长阶段中的变化仍比较明显。

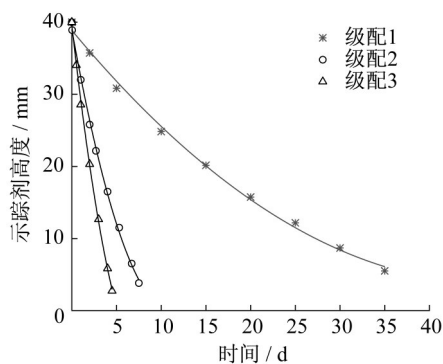


图10 不同颗粒级配下示踪剂位移

Fig. 10 Tracer transport at different particle gradations

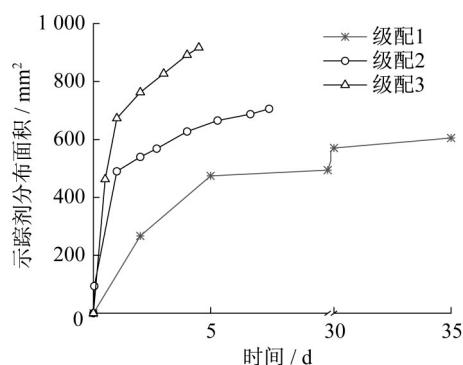


图11 不同颗粒级配下示踪剂分布面积

Fig. 11 Tracer distribution area at different particle gradations

3.3 不同孔隙比下示踪剂迁移

为探究不同孔隙比对示踪剂迁移的影响,选取

0.30、0.45、0.60三种孔隙比进行了迁移试验,得到的示踪剂位移曲线如图12所示。从图12可以看出,孔隙比越低,迁移速率越小,并且不同孔隙比下迁移速率差别较大。当孔隙比为0.60时,迁移速率几乎不随时间的变化而改变。图13为不同孔隙比下示踪剂分布面积。从图13可知,孔隙比越低,示踪剂迁移分布面积最小。这是因为孔隙越多,溶质迁移效果越明显,分布面积也就越大。当孔隙比超过0.45时,表现为覆盖面积增长速度基本一致,示踪剂分布面积在两个发展阶段的变化不再明显。

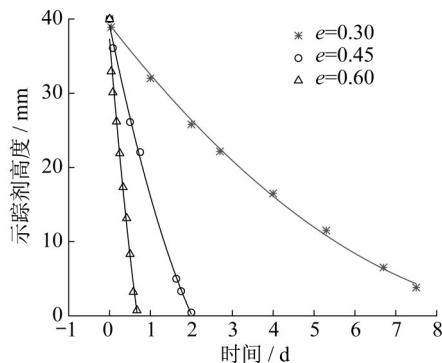


图12 不同孔隙比下示踪剂位移

Fig. 12 Tracer transport at different void ratios

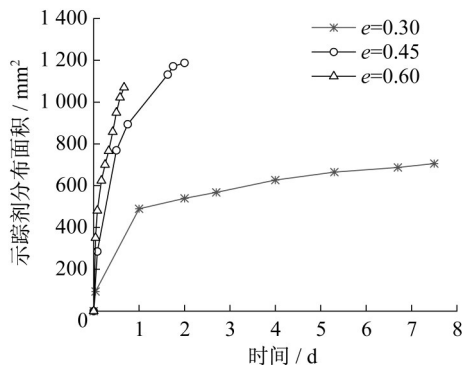


图13 不同孔隙比下示踪剂分布面积

Fig. 13 Tracer distribution area at different void ratios

4 结论

(1) 基于透明土材料和Matlab图像处理技术,可以实现示踪剂迁移规律的非侵入式研究,与常规测试方法相比,可以直观、连续地获得示踪剂的实时迁移数据。

(2) 随着迁移的进行,示踪剂在竖直方向上整体下移,并且迁移速率不断减小,示踪剂位移与时间近似成二次函数关系。渗透压力差越高、孔隙比越

大、大颗粒含量越高,示踪剂竖向迁移速率越大。

(3) 示踪剂迁移主要受对流和扩散的影响,孔隙比越大、大颗粒含量越高、渗透压力差越大时,相同时刻内示踪剂分布面积越大,反之越小;示踪剂分布面积随着时间的发展可分为两个阶段:其一为快速发展阶段,主要从示踪剂开始迁移至离开“土层”表面,表现为分布面积增速大,示踪剂分布面积的增长主要在此阶段完成;其二为“土体”内部迁移阶段,主要表现为分布面积缓慢增加,本阶段主要受对流因素的影响。

参考文献:

- [1] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2019-04-17]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. [2019-04-17]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [2] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
SUN Tieheng, LI Peijun, ZHOU Qixing, *et al.* Mechanism and repair technology of soil pollution [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 1.
LIU Songyu. Geotechnical investigation and remediation for industrial contaminated sites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 1.
- [4] 唐小龙, 吴俊锋, 王文超, 等. 有机污染土壤原位化学氧化药剂投加方式的综述[J]. 化工环保, 2015, 35(4): 376.
TANG Xiaolong, WU Junfeng, WANG Wenchao, *et al.* A review of in-situ chemical oxidation injection method for organic contaminated soil [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(4): 376.
- [5] 宛召. 高压旋喷工艺在上海某污染场地修复中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WAN Zhao. Study on the application of high pressure jet grouting technology in the remediation of a contaminated site in Shanghai[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [6] GUERRERO J S P, SKAGGS T H. Analytical solution for one-dimensional advection-dispersion transport equation with distance-dependent coefficients [J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(1/2): 57.
- [7] 郑顺安, 李仪, 普锦成, 等. 污水灌溉条件下Cu在农田土壤中的运移及其模拟研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(3): 343.
ZHENG Shun'an, LI Yi, PU Jincheng, *et al.* Evaluating transport of Cu in agricultural soils under sewage irrigation [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture. & Life Sciences,

- 2011, 37(3): 343.
- [8] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 土壤中Cd、Pb、Hg离子的地球化学行为模拟实验[J]. 地质通报, 2009, 28(5): 659.
- WANG Yaping, WANG Lan, XU Chunxue, *et al.* Simulation experiment on the geochemical behavior of cadmium, lead and mercury ions in the soil[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(5): 659.
- [9] FOX P J, LEE J, LENHART J J. Coupled consolidation and contaminant transport in compressible porous media [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 2(2): 113.
- [10] 林青, 徐绍辉, 王凯丽. 不同质地土壤中镉运移的数值模拟与预测[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 478.
- LIN Qing, XU Shaohui, WANG Kaili. Numerical simulation and prediction of cadmium transport in soils with different textures [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 478.
- [11] 商建英. 镉在土壤中吸附特性的研究及运移动态的数值模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- SHANG Jianying. Study on adsorption characteristics and numerical simulation of cadmium transport in soils [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003.
- [12] 隋旺华, 高岳. 透明土实验技术现状与展望[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 577.
- SUI Wanghua, GAO Yue. Status and prospect of transparent soil experimental technique [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577.
- [13] ISKANDER M, LIU J, SADEKS S. Transparent amorphous silica to model clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262.
- [14] LIU J, ISKANDER M. Modeling capacity of transparent soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 451.
- [15] 宫全美, 周俊宏, 周顺华, 等. 透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(6): 854.
- GONG Quanmei, ZHOU Junhong, ZHOU Shunhua, *et al.* Strength property and feasibility test of transparent soil to model clayey soil [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(6): 854.
- [16] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619.
- [17] 孔纲强, 孙学谨, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1303.
- KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LIU Hanlong, *et al.* Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(11): 1303.
- [18] LO H, TABE K, ISKANDER M, *et al.* A transparent water-based polymer for simulating multiphase flow [J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(1): 1.
- [19] 姜海波, 武亚军, 孔纲强, 等. 超软土真空预压透明土模型试验及土桩形成机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 33.
- JIANG Haibo, WU Yajun, KONG Gangqiang, *et al.* Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and formation mechanism of soil pile [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 33.
- [20] 牟天瑜, 武周虎, 周立俭, 等. Matlab 图像处理技术在水环境扩散实验研究中的应用[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2015, 25(5): 58.
- MU Tianyu, WU Zhouhu, ZHOU Lijian, *et al.* The application of Matlab image processing technology in the research on diffusion experiment of water environment [J]. Journal of EMCC, 2015, 25(5): 58.
- [21] BLACK J A, TAKE W A. Quantification of optical clarity of transparent soil using the modulation transfer function [J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 588.
- [22] 刘德龙. 重金属镉在上海浅地层中的纵向迁移吸附试验及模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LIU Delong. Experimental and simulation study on adsorption and migration of heavy metal cadmium in shallow strata of Shanghai [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [23] 叶正强, 李爱群, 杨国华, 等. 黏性土的渗透规律性研究[J]. 东南大学学报, 1999(5): 121.
- YE Zhengqiang, LI Aiqun, YANG Guohua, *et al.* Study of permeability for cohesive soil [J]. Journal of Southeast University, 1999(5): 121.