

上海软黏土的非水相有机液体固结渗透仪渗透试验

高彦斌, 居奕含

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 在饱和黏性土的非水相有机液体(NAPL)渗透试验中, NAPL-土的相互作用易导致土样收缩而产生侧壁渗漏, 影响试验结果的可靠性。采用固结渗透仪开展了上海淤泥质黏土的煤油渗透试验, 研究竖向固结压力 p_v 的大小和土样结构性对侧壁渗漏以及试验结果的影响。研究结果表明, 絮凝结构的原状土样在 p_v 为 50 kPa、200 kPa 下均存在侧壁渗漏, 测得的渗透系数偏大, 在 $p_v = 400$ kPa 下可得到可靠的试验结果。对于分散结构的重塑土, 在 $p_v = 400$ kPa 下仍然存在侧壁渗漏。根据原状土样的孔径分布以及在 $p_v = 400$ kPa 下的渗透试验结果, 讨论了上海淤泥质黏土中 NAPL 渗透的基本特性, 对了解沿海软黏土中 NAPL 类污染物的迁移特征有指导价值。

关键词: 非水相有机液体; 渗透试验; 饱和黏性土; 侧壁渗漏; 固结渗透仪

中图分类号: TU42

文献标志码: A

NAPL Permeation Tests of Shanghai Saturated Clay Using Consolidation Permeameter

GAO Yanbin, JU Yihan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In non-aqueous phase liquid (NAPL) permeation test of saturated clay, NAPL-clay interactions can lead to sample shrinkage and sidewall leakage, which affects the reliability of the test results. Kerosene permeation tests using consolidation permeameter were conducted on Shanghai mucky clay to investigate the influence of vertical consolidation pressure p_v and the soil structure on sidewall leakage and test results. The test results show that for intact samples with a flocculation structure, sidewall leakage occurred at $p_v = 50$ kPa and 200 kPa, resulting in an overestimation of permeability coefficient, while reliable test results can be obtained at

$p_v = 400$ kPa. However, for remolded samples with a dispersed structure, sidewall leakage still existed even at $p_v = 400$ kPa. Based on the pore distribution of the intact soil sample and the test results at $p_v = 400$ kPa, the characteristics of NAPL permeation in Shanghai mucky clay are discussed in detail. These results are valuable for understanding the migration characteristics of NAPL pollutants in coastal soft clay.

Keywords: non-aqueous phase liquids(NAPL); permeability test; saturated clay; sidewall leakage; consolidation permeameter

人类工业活动产生的种类繁多的非水相有机污染物(non-aqueous phase liquids, NAPLs)是最复杂棘手的污染物质之一。这类物质通常具有低水溶性、易挥发性、毒性和致癌性以及难降解性等特点, 在饱和土中主要以 NAPL-水两相流的方式迁移。室内渗透试验是研究 NAPL 在土中的迁移特性的主要方法。与普通的渗透试验不同的是, 对于饱和黏性土需要考虑的一个特殊因素, 即 NAPL-土之间的相互作用。NAPL 类的有机液体普遍具有较低的介电常数, 进入土中后可显著改变孔隙溶液的物理化学特性, 导致黏土颗粒的双电层结构发生改变^[1]。这种作用可进一步导致黏性土的微结构和渗透性发生改变, 也会对渗透试验的方法及试验结果产生影响^[2-11]。已有研究表明, 渗透仪类型、土的特性、有机液体特性都会对这种相互作用以及试验结果产生影响。

饱和黏性土中的 NAPL 渗透试验常采用的渗透仪主要有: 刚性壁渗透仪、柔性壁渗透仪、固结渗透仪。一些学者对比了刚性壁渗透试验和柔性壁渗透试验的结果, 发现刚性渗透仪测得的渗透系数总体上大于柔性壁渗透仪测得的, 一些试验结果甚至大

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(41772293)

第一作者: 高彦斌, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软黏土力学特性与软土工程。

E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

相径庭:刚性渗透仪测得的 NAPL 渗透系数大于水的渗透系数,而柔性壁渗透仪测得的则远小于水的渗透系数^[12-13]。Mitchell 等^[2]曾评价了这几种渗透仪优点和局限性,认为刚性渗透仪由于潜在的侧壁渗漏问题通常会使测试渗透系数偏大;柔性壁渗透仪侧向施加的恒定的压力容易造成土中一些孔隙或裂隙的闭合,从而导致测试渗透系数偏小;固结渗透仪可靠性最高,能够在土体原位应力状态下进行测试且能够限制侧壁渗漏。Dunn 等^[14]曾使用固结渗透仪对 2 种粉质黏土分别进行了纯水和合成酸性铅锌尾矿渗滤液注入试验。Fernandez 和 Quigley^[15-17]使用加装弹簧的改装刚性壁渗透仪在加压条件下对重塑压实伊犁土进行了乙醇、二恶烷渗透试验^[16],采用弹簧力对试样施加恒定的压力,试验结果表明,乙醇渗透时固结压力 $p_v=70\text{kPa}$ 可以限制侧壁渗漏、得到可靠的渗透系数,而二恶烷渗透则需要 200kPa 以上的压力。

我国沿海地区广泛分布海相沉积饱和软黏土,且有工程案例表明这类地层中存在 NAPL 深部污染^[18]。国内外采用固结渗透仪研究饱和软黏性土中 NAPL 渗透特性的工作并不多,缺乏对其中一些基本问题的认识。例如应该施加多大竖向荷载可以有效地防止侧壁渗漏、NAPL 在这类黏性土中的渗

透特征以及与土样孔隙结构的关系。本文采用固结渗透仪开展了上海软黏土的煤油注入试验,研究不同固结压力 p_v ($50\sim 400\text{kPa}$) 下的渗透特性,为了更为准确地分析渗透过程以及判断侧壁渗漏情况,在试验结束后检测了土样中不同位置的煤油含量,并结合土样的孔隙特征讨论了 NAPL 在这类黏性土中的渗透特征。

1 试验材料、设备及方案

试验采用的 NAPL 为商用 #3 航空煤油, 20°C 下的物性参数见表 1。煤油在水中的溶解度很小(几乎不溶于水),且对人体毒害较小,是室内研究 NAPL—水两相流渗透特性较为理想的试验材料。煤油的介电常数为 2.0,远小于水的介电常数 78.5,因此会与黏性土产生强烈的相互作用,改变黏土颗粒的双电层结构以及微结构。为了便于观察煤油的渗透过程,采用苏丹红 III 染色剂对煤油进行染色,染色后的煤油为赤红色。试验土样为采用薄壁取土器采取的上海原状淤泥质粉质黏土,取土深度为 $7.0\sim 7.3\text{m}$,其基本物理特性见表 2。土样的液限 w_L 为 38.3%,塑性指数 I_p 为 16.8,属于低塑性软黏土。

表 1 20°C 航空煤油特性

Tab. 1 Characteristics of kerosene at 20°C

水中溶解度/ ($\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	极性	相对介电常数	油水界面张力/ ($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)	动力黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
0.03	0.810	<0.1	2.0	24	2.710

表 2 上海淤泥质粉质黏土的特性

Tab. 2 Characteristics of Shanghai mucky silty clay

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	液性指数
1.84	38.35	38.3	21.5	16.8	1.003

煤油渗透试验方案见表 3。共进行了 4 个土样的渗透试验,其中 3 个为原状土样(1、2、3 号),1 个为重塑土样(4 号),用以对比固结压力以及土样结构性的影响。渗透试验土样的初始高度 $h_0=4\text{cm}$,截面积 $A=30\text{cm}^2$ 。3 个原状土样的竖向固结压力 p_v 分别为 50kPa 、 200kPa 和 400kPa ,1 个重塑土样的固结压力 $p_v=400\text{kPa}$ 。土样固结后首先进行注水试验,测得水渗透系数 k_w ,随后进行煤油注入试验,测得煤油渗透系数 k_N 。这些渗透试验采用的注入压力约为 10kPa ,水力梯度 i 大约为 $25\sim 30$ 。

渗透试验系统如图 1 所示,由渗压加荷装置、注

表 3 煤油渗透试验方案

Tab. 3 Scheme of kerosene permeation tests

土样 编号	土样 类型	固结压 力/ kPa	初始孔 隙比	固结后土样 高度/ cm	固结后 孔隙比	水力 梯度
1号	原状	50	0.856	3.830	0.777	26.11
2号	原状	200	1.041	3.894	0.987	25.68
3号	原状	400	1.139	3.385	0.810	29.54
4号	重塑	400	0.960	3.321	0.627	30.11

入装置(液压控制器)、油—水转换器和固结渗透腔构成。固结渗透腔的结构见图 2 所示,试验中流体经底座进液口注入腔体内的土样,土样顶部施加竖向荷载。

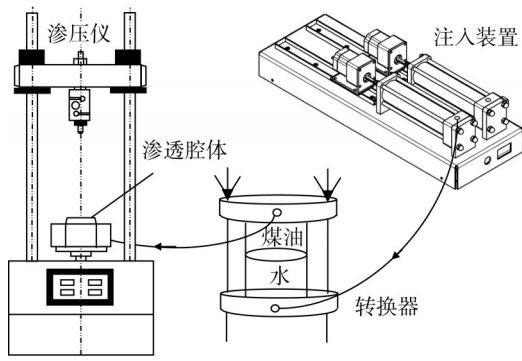


图1 固结渗透试验系统

Fig. 1 Permeation test system using consolidation permeameter

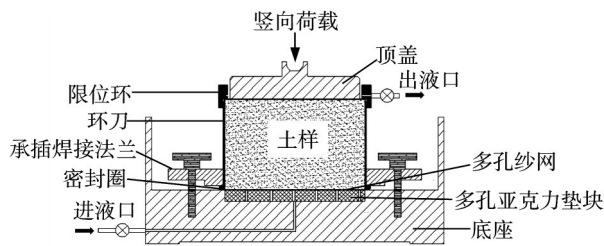


图2 固结渗透腔

Fig. 2 Diagram of consolidation permeameter

详细试验步骤如下:

(1)切样和装样。用钢环刀垂直切取高 $L=4$ cm、面积 $A=30$ cm²的圆柱土样,切土过程中小心保证环刀与土样之间不产生任何缝隙,然后将土样连同钢环刀一起装在固结渗透仪中。

(2)排水固结。关闭进液口阀门,设置竖向加载 p_w 后启动加载,土样在恒定荷载下固结24 h。固结后的土样高度 h 和孔隙比 e 见表3。

(3)水的渗透。连接液压控制器和渗透仪,打开渗透腔进液口阀门,设置注入压力 $p_w=10$ kPa,进行渗透试验,待流量 Q_w 稳定一段时间后停止试验,渗透试验的时长为4~5 h。

(4)煤油渗透。渗透腔和液压控制器之间连接转换器,设置煤油注入压力 $p_N=10$ kPa,开始进行煤油注入试验,待腔体上方观测到煤油渗出且渗透系数稳定后停止试验。

渗透试验结束后,取出土样将表面残余的煤油小心用清水冲洗。然后将土样竖向切成两半,一份用来做压汞试验以分析土的微结构,另外一份用来测定土样中煤油的含量。测定煤油的那一半土样横向切分为上、中、下3份,每份约重20~30 g,标记后装袋送至专业检测机构进行煤油含量检测。检测方法采用气相色谱法(gas chromatography, GC),这种

方法主要是针对难降解的氯苯类化合物和挥发性有机污染物。检测前,需要首先对土样中的油类组分进行提取,随后对提取后的油类组分进行分离、浓缩、清洗、皂化、过滤、转移、稀释、层析等一系列预处理,最后再采用气相色谱法进行分析总石油烃(TPH)的含量。

渗透试验采用定水头的方法,可以根据达西定律计算渗透系数。水的渗透系数为

$$k_w = \frac{\bar{v}}{i} = \frac{Q_w}{A\Delta t} \cdot \frac{\rho_w g h}{100 p_w} \quad (1)$$

煤油渗透系数为

$$k_N = \frac{\bar{v}}{i} = \frac{Q_N}{A\Delta t} \cdot \frac{\rho_w g h}{100 p_N} \quad (2)$$

式中: \bar{v} 为达西流速,即假设水流通过整个过水断面时的流速,小于实际流速 v ; i 为水力梯度; Q_w 和 Q_N 分别为一段时间 Δt 内流经土样的水的流量和煤油流量, cm³; A 为试样垂直渗流方向的截面积, cm²; t 为渗透时间; h 为渗流路径长度,即土样固结后的高度, cm; p_w 和 p_N 分别为注入水和煤油的压力, kPa; ρ_w 为水的密度, g·cm⁻³; g 为重力加速度, 9.8 m·s⁻²。

2 渗透试验结果

2.1 水的渗透

图3给出了4个土样的注水渗透阶段的流量 Q_w 与时间 t 的关系曲线。由图可知,渗透试验进行1 h以后,4个土样的 Q_w-t 曲线均接近直线,渗透系数几乎不随时间变化,达到稳定渗流状态。采用式(1)计算得到的水的渗透系数 k_w 分别为 0.385×10^{-7} cm·s⁻¹、 2.55×10^{-7} cm·s⁻¹、 1.13×10^{-7} cm·s⁻¹、 0.357×10^{-7} cm·s⁻¹,对应的固结后孔隙比 e 分别为0.777、0.987、0.810、0.627。可以看出水的渗透系数 k_w 与土样固结后孔隙比 e 密切相关。孔隙比较大的土样(2号、3号)的渗透系数明显大于孔隙比较小的土样(1号、4号)。经统计分析 k_w 和 e 的关系可近似采用式(3)表示:

$$\lg k_w = 2.5e - 9.098 \quad (3)$$

式中: k_w 为水的渗透系数, cm·s⁻¹。

2.2 煤油的渗透

图4给出了1号土样($p_w=50$ kPa, $p_N=10.5$ kPa)的煤油流量 Q_N 、渗透系数 k_N 与时间 t 的关系曲线。渗透过程可以分为3个阶段。在阶段I($t=0\sim 16$ h), Q_N 稳定上升2.3 ml左右, k_N 较为稳定,保持在 3.0×10^{-8} cm·s⁻¹左右,与注水阶段的渗透系数 $k_w=$

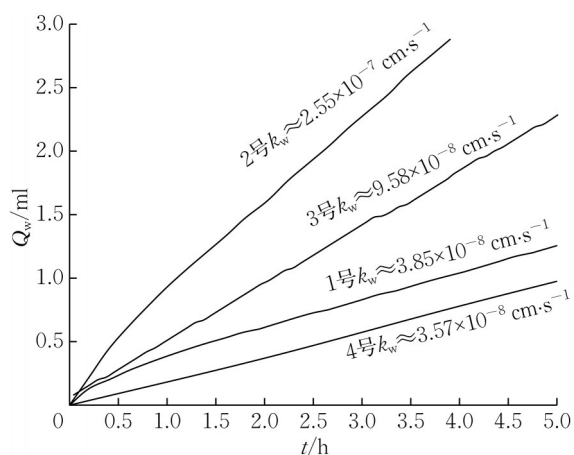


图3 4个土样注水渗透的流量曲线

Fig. 3 Curves of water permeation quantity Q_w of four soil samples

$3.85 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 较为接近。这一阶段是煤油驱替管路中的残余水,测得的渗透系数其实是水的渗透系数,这种现象在其他试验中也存在。随后的阶段

II ($t=16 \sim 40 \text{ h}$),煤油开始进入渗透腔中的土样,注入速率明显减小, k_N 的平均值下降至 $5.9 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,约为第I阶段的1/4。在阶段III ($t=40 \sim 41 \text{ h}$),煤油注入速率突然增大,红色的煤油从环刀及垫块间的缝隙漏出流至腔体(如图5), Q_N 在1 h内增加了7 ml左右, k_N 突增至 $6.1 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,约为第II阶段的1000倍,这些现象表明很可能存在侧壁渗漏。

图6给出2号土样($p_v=200 \text{ kPa}, p_N=10.0 \text{ kPa}$)的 Q_N 及 k_N 随时间 t 的变化。渗透过程大致可以分为2个阶段。阶段I ($t=0 \sim 2 \text{ h}$)属于管路中残余水的驱替,2h内 Q_N 增加至8ml左右, k_N 为 $2.32 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,与注水阶段的渗透系数 $k_w=2.55 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 接近。在阶段II ($t=2 \sim 15.5 \text{ h}$)中,前2h注入速率变缓,然后开始逐渐增大,在13.5 h内流量达到了80 ml, k_N 上升至 $3.6 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,约为 k_w 的1.5倍,同时观测到与1号土样中类似的红色煤油从顶部渗出的现象,表象上看可能存在侧壁渗漏。

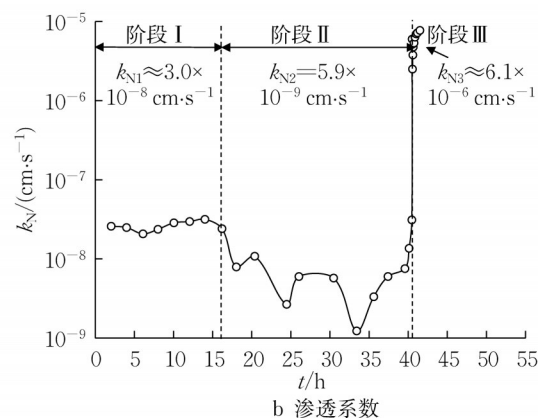
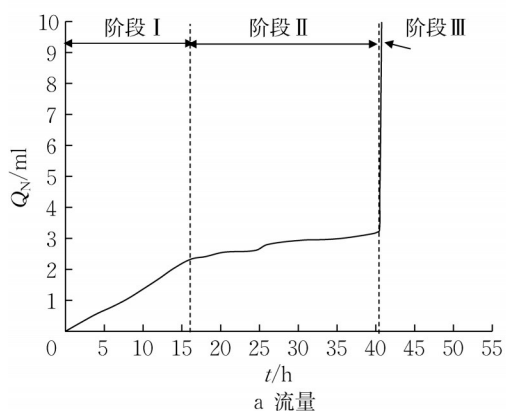


图4 1号土样 ($p_v=50 \text{ kPa}, p_N=10.5 \text{ kPa}$)的煤油流量与渗透系数

Fig. 4 Q_N and k_N of soil sample No.1 at $p_v=50 \text{ kPa}$ and $p_N=10.5 \text{ kPa}$



图5 $t=40 \text{ h}$ 时1号土样流出的煤油

Fig. 5 Sudden flowing of kerosene in cell of sample No. 1 at $t=40 \text{ h}$

图7给出了3号土样($p_v=400 \text{ kPa}, p_N=10.5 \text{ kPa}$)的 Q_N 及 k_N 随时间 t 的变化。渗透过程大致分为2个阶段。阶段I ($t=0 \sim 2 \text{ d}$)为残余水的驱替, $k_N=9.58 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,与注水阶段的 $k_w=1.13 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 非常接近。阶段II ($t=2 \sim 95 \text{ d}$)的煤油注入速率显著降低,在前40 d内 k_N 约为 $4.6 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;随后注入速率进一步降低, k_N 降低至 $1.4 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,一直持续到第95 d。在长达3个月的阶段II中,平均渗透系数为 $2.59 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,约为 k_w 的1/50。3号土样在阶段II的煤油总注入量 Q_N 达到20 ml,但渗透腔体内始终未观察到红色煤油流出,似乎所有煤油都留存在土样的孔隙中。

图8给出了4号土样($p_v=400 \text{ kPa}, p_N=$

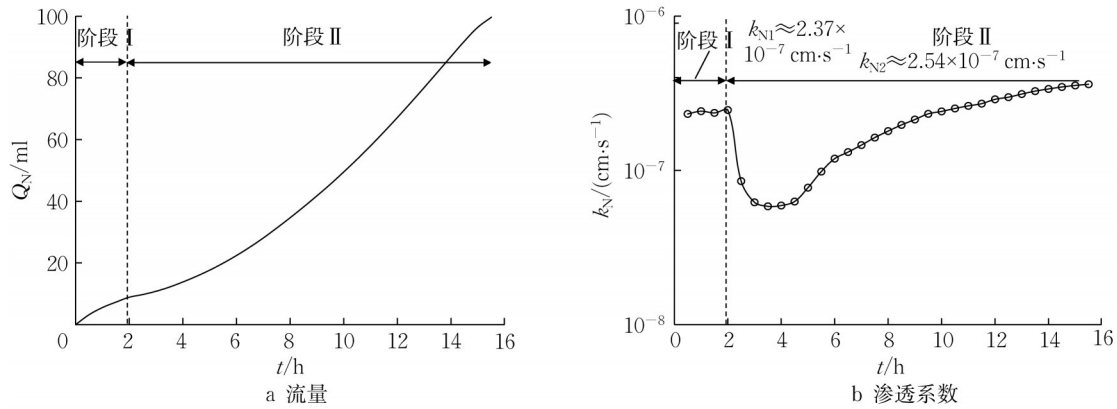


图 6 2号土样 ($p_v=200\text{kPa}$, $p_N=10.0\text{kPa}$)的煤油流量与渗透系数

Fig. 6 Q_N and k_N of soil sample No. 2 at $p_v=200\text{kPa}$ and $p_N=10.0\text{kPa}$

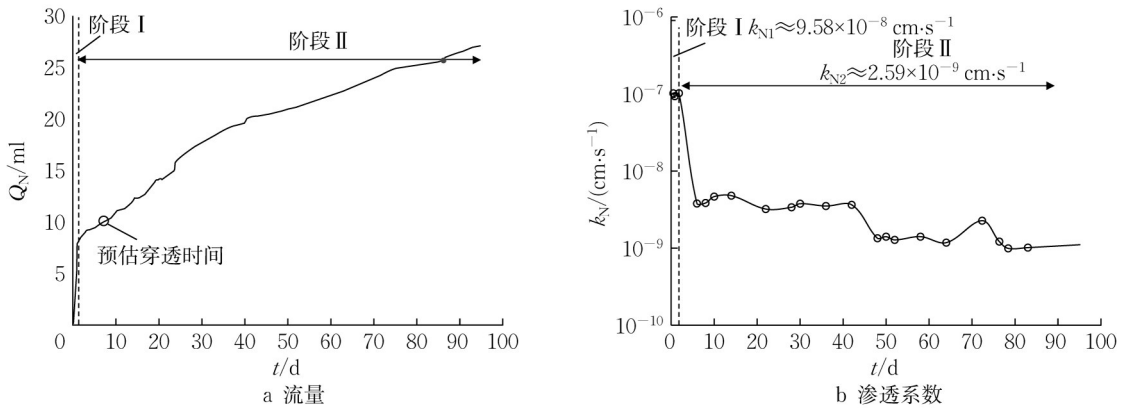


图 7 3号土样 ($p_v=400\text{kPa}$, $p_N=10.5\text{kPa}$)的煤油流量与渗透系数

Fig. 7 Q_N and k_N of soil sample No.3 at $p_v=400\text{kPa}$ and $p_N=10.5\text{kPa}$

10.5 kPa)的 Q_N 与 k_N 随时间 t 的变化,整个过程分为 3个阶段。阶段 I($t=0\sim 3.5\text{d}$)仍然属于残余水的驱替, k_N 基本保持在 $3.38\times 10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,与 $k_w=3.57\times 10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 较为接近。阶段 II($t=3.5\sim 18.5\text{d}$)注入速率变得十分缓慢,在 15 d 的时间内仅注入了 1 ml 左右,对应渗透系数 k_N 为 $1.09\times 10^{-9}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,与 3号土样接近。但在试验进行至 18.5d 时注入速率突然

从以上 4个渗透试验结果可以看出,在驱替完管路中的残余水后煤油渗透的过程中,4个试样的渗透现象差别较大。其中 1号($p_v=50\text{kPa}$)、2号($p_v=200\text{kPa}$)和 4号样($p_v=400\text{kPa}$, 重塑土)均出现了渗透系数由小增大的现象,从表象上可以判断 1号样产生侧壁渗漏,但是无法判断 2号、4号土样是否存在侧壁渗漏。3号土样($p_v=400\text{kPa}$)的渗透系数一直维持在较低的水平,似乎实验是正常的,不存在侧壁渗漏。这 4个土样的煤油渗透过程究竟如何,煤油从环刀侧壁渗出还是从土样内部渗出,还需要借助煤油含量检测的结果进行分析。

加快(阶段 III),随后 10 d 内 Q_N 增加了近 40 ml,平均渗透系数 k_N 增加至 $5.87\times 10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,约为第 II 阶段的 50 倍。试验结束时在腔体内聚集了少量(仅约几毫升)的煤油,远小于注入的煤油总量(约 40 ml),而且无法确定这些煤油是从腔体侧壁还是土样内部渗出。

3 煤油含量及渗透过程分析

4个土样渗透试验后的煤油含量检测结果见表 4,其中未检出煤油代表土样中煤油含量小于检测灵敏度值 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这里给出的煤油含量指的是单位质量湿土中的煤油质量,平均煤油含量为上、中、下三部分煤油含量按照土样质量进行加权平均的数值。

1号土样和 2号土样中未检出煤油,表明煤油并未注入土样。因此渗透过程可能为:底部注入的煤油与土样产生相互作用,土样底部产生收缩裂隙,煤油沿着土样与环刀间的缝隙逐渐渗入,直到缝隙上

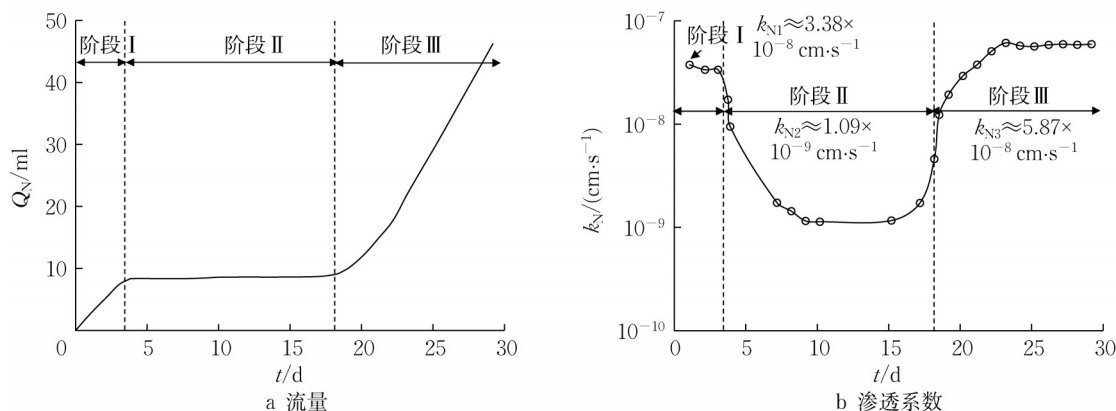
图8 4号土样 ($p_v=400\text{kPa}$, $p_N=10.5\text{kPa}$)的煤油流量与渗透系数Fig. 8 Q_N and k_N of soil sample No. 4 at $p_v=400\text{kPa}$ and $p_N=10.5\text{kPa}$

表4 煤油含量检测结果

Tab. 4 Result of kerosene content measurement

单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				
土样编号	上部	中部	下部	平均
1号	未检出	未检出	未检出	
2号	未检出	未检出	未检出	
3号	15 720	4 800	4 500	7 440
4号	未检出	5 220	16 100	3 048

下贯穿造成侧壁渗漏。2个试验中侧壁渗漏对试验结果的影响规律明显不同:低压力下(1号土样, $p_v=50\text{kPa}$)表现出突然穿透的特征,渗透量激增,渗透系数 k_N 达到 k_w 的200倍;较高压力下(2号土样, $p_v=200\text{kPa}$)表现为油渗透系数 k_N 缓慢增大到 k_w 的2倍左右。固结压力越大,侧壁渗漏现象越不明显,也越难以判断。

3号土样的固结压力 $p_v=400\text{kPa}$,土样下、中、上部均检测到了煤油。上部含量较高,为 $15.72\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中部与下部含量较低且较为均匀,分别为 $4.8\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $7.44\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这些结果表明,该试验中煤油成功注入土样的孔隙中,并最终穿透土样。根据平均煤油含量可以采用式(4)得到土样中的煤油体积 V_N :

$$V_N = \frac{C \cdot m_s}{\rho_N} \quad (4)$$

式中: m_s 为土样质量, kg ; C 为单位质量的土中的煤油含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; V_N 为土中煤油体积, ml ; ρ_N 为煤油密度,取 $0.81\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。计算得到3号土样中的煤油体积 V_N 为 1.906ml 。这意味着在第II阶段开始后约6d,即土样中注入煤油不到2ml时(图7a中的圆点)便已穿透土样,随后不断从土样顶部渗出,在93d渗透了约19ml。但是,试验过程中始终未观测到煤油渗出,其原因可能是煤油渗透速率过于缓慢

(平均每天仅0.2ml),且挥发性较强,渗出的煤油绝大部分挥发在空气中,因此腔体中未积聚液态煤油。3号土的试验结果说明,采用 $p_v=400\text{kPa}$ 可以限制原状土样的收缩与侧壁渗漏,得到可靠的渗透试验结果。

4号土样的煤油含量平均值为 $3.048\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,下部检测到的煤油含量值较高,为 $16.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中部含量为 $5.22\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,但在上部未检出。该试验中煤油的渗透过程应该是:煤油首先渗入土样下部和中部,这个阶段对应的渗透系数较低(阶段II);煤油一土的相互作用导致土样产生收缩缝隙,渗透系数逐渐加大(阶段III),最终发生侧壁渗漏,煤油从侧壁渗出而未穿透土样上部。侧壁渗漏阶段的渗透系数 k_N 与 k_w 处于一个数量级,与1号、2号土样相比侧壁渗漏现象比较轻微,侧壁缝隙应该更小。这说明在固结压力 $p_v=400\text{kPa}$ 时,重塑土样仍然会产生侧壁渗漏现象,导致测试结果失真。由此可见,重塑土中煤油一黏土的相互作用比原状土更强烈,需要采用更大的固结压力才能够限制侧壁渗漏。

4 软黏土中 NAPL 渗透特征

根据多孔介质两相流理论,饱和黏性土中的 NAPL 渗透系数 k_N 与 NAPL 的饱和度 S_{rN} 有关(NAPL 的饱和度 S_{rN} 为 NAPL 的体积与土中孔隙总体积之比)。NAPL 饱和度 S_{rN} 越小,渗透系数 k_N 也越小。根据3号土样的煤油含量得到煤油的总体积 V_N 以及饱和度 S_{rN} 关系为

$$S_{rN} = \frac{V_N}{V_v} = \frac{V_N}{V_0 \cdot (e/(1+e))} \quad (5)$$

式中: V_0 和 V_v 分别为固结后土样的总体积和孔隙总

体积; e 为土样的孔隙比。计算得到的3号土样的 V_N 、 V_0 、 V_v 、 S_{rN} 见表5。煤油总体积 $V_N=1.906$ ml,煤油饱和度 S_{rN} 为3.76%。可以看出,煤油只是进入土中的一少部分孔隙中。由于煤油饱和度较小,因此渗透系数 k_N 远小于水的渗透系数 k_w ,前者仅为后者的1/50。

表5 3号土样计算结果

Tab. 5 Calculation results of sample No.3

煤油体积/ml	固结后土样 体积/cm ³	固结后孔隙 总体积/ml	煤油饱和度/%
1.906	101.56	45.45	3.76

渗透试验中NAPL的穿透时间取决于NAPL的真实流速而非达西流速,真实流速与达西流速之间的关系为

$$v = \frac{\bar{v}}{S_{rN}n} = \frac{\bar{v}}{S_{rN} \cdot [e/(1+e)]} \quad (6)$$

式中: \bar{v} 为NAPL达西流速,cm·s⁻¹;v为NAPL真实流速,cm·s⁻¹;S_{rN}为NAPL饱和度。3号土样固结后的孔隙比 e 为0.81,煤油的达西流速 \bar{v} 为 1.36×10^{-7} cm·s⁻¹,采用式(6)计算得到的煤油的真实流速 $v=0.805 \times 10^{-5}$ cm·s⁻¹,为达西流速 \bar{v} 的59倍。固结后土样高度 $h=3.385$ cm,根据 h/v 计算煤油穿透时间为4.8 d,与根据煤油含量推测的穿透时间

为6 d比较吻合。

两相流理论认为在毛管压力 p_c (NAPL与水的压力的差值)作用下,NAPL首先驱替大孔隙中的水,随着毛管压力的增大,逐步驱替较小孔隙中的水。图9a中给出了压汞试验得到的3号土样的孔隙体积含量 V 与孔隙直径 d 的关系曲线。注意这里的孔隙体积含量为单位干土质量的孔隙体积。根据实测煤油的饱和度 $S_{rN}=3.76\%$,采用式(7)可以计算得到煤油进入的孔隙体积总量 V 为

$$V = \frac{eS_{rN}}{G_s\rho_w} \quad (7)$$

式中:S_{rN}为煤油的饱和度,S_{rN}=3.76%;G_s为土颗粒的比重,G_s=2.75;ρ_w为水的密度,ρ_w=1 g·ml⁻¹;e=0.81。计算得到的煤油进入的孔隙体积总量 V 为0.011 ml·g⁻¹,在图9a的压汞曲线上对应的孔隙直径 $d=15 \mu\text{m}$,表明煤油注入孔隙直径 $d>15 \mu\text{m}$ 的孔隙中。图9b给出了3号土样的孔隙体积增量 dV 与孔隙直径 d 的关系曲线,可以看出大部分孔径集中在0.2~2 μm。对于具有絮凝结构的海相沉积黏土,直径 $d>15 \mu\text{m}$ 的孔隙为含量较少的团粒之间的大孔隙,土样中煤油的含量取决于于这部分孔隙体积的多少。上海软黏土中这部分大孔隙在土中的含量较少,因此土中煤油的含量也较少。这应该是NAPL在这类软黏土中迁移的一个基本特征。

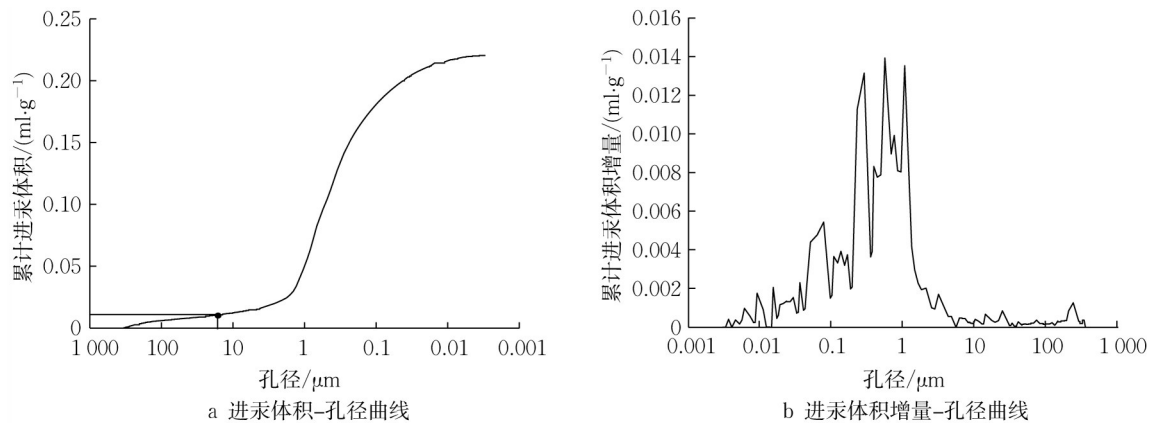


图9 3号土样的孔隙分布

Fig. 9 Pore distribution of sample No. 3

5 结论

采用固结渗透仪对上海淤泥质黏土进行了不同固结压力下的煤油渗透试验,以研究NAPL在这类软黏土中的渗透特性,以及固结压力对潜在的侧壁渗漏及试验结果的影响,得到的主要结论如下:

(1)低压力下易产生侧壁渗漏而导致测试结果失真。侧壁渗漏现象在较低压力下较为明显(如1号土样),但在较高压力下难以判断(如2号、4号土样)。试验后检测试样中NAPL含量是一个检验是否存在侧壁渗漏的有效方法。

(2)固结压力400 kPa下能够消除原状土样的侧

壁渗漏,但仍然不能消除重塑土样的侧壁渗漏,表明土的结构对 NAPL—土的相互作用以及侧壁渗漏有一定的影响,分散结构的重塑土比絮凝结构的原状土更容易产生侧壁渗漏。

(3)从3号土样的试验结果来看,在毛细管力 $p_c=10$ kPa 下煤油渗透系数仅为水渗透系数的1/50。NAPL 主要进入直径大于 $15\ \mu\text{m}$ 的孔隙大孔隙(占总孔隙体积的3.76%左右)。需要注意的是,NAPL 的真实流速远大于达西流速,10 kPa 注入压力下6 d 即可穿透4 cm 厚的土样。

(4)固结渗透试验系统是一个开放的试验系统,由于大部分 NAPL 具有较强的挥发性,在流速和流量较低的情况下,渗出的 NAPL 绝大部分挥发在空气中而不易被观测到,不能误认为注入的 NAPL 全部留在土样,这也是软黏土中 NAPL 渗透的一种特征。

作者贡献声明:

高彦斌:提出理论分析方法,指导试验过程及理论分析,指导论文撰写及修改。

居奕含:参与试验、数据处理与理论分析,论文初稿撰写。

参考文献:

- [1] KAYA A, GALVAO C. Hydraulic conductivity of fine-grained soils permeated with water-organic liquid mixtures [C]// Proceeding of the Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment. London: Thomas Telford Publishing, 1998: 201-251.
- [2] MADSEN F T, MITCHELL J K. Chemical effects on clay fabric and hydraulic conductivity [J]. The Landfill, 1989, 20:201.
- [3] KHAMEHCHIYAN M, CHARKHABI A H, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils [J]. Engineering Geology, 2007, 89(3): 220.
- [4] SINGH S K, SRIVASTAVA R K, JOHN S. Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9):1077.
- [5] 边汉亮,蔡国军,刘松玉,等.有机氯农药污染土强度特性及微观机理分析研究[J].地下空间与工程学报,2014, 10(6):1317
BIAN Hanliang, CAI Guojun, LIU Songyu, *et al.* Strength properties and microscopic mechanism of organochlorine pesticide contaminated soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1317.
- [6] AYRAL D, OTERO M, GOLTZ M N, *et al.* Impact of DNAPL contact on the structure of smectitic clay materials[J]. Chemosphere, 2014, 95:182.
- [7] AYRAL D. Impact of Clay-DNAPL Interactions on the transport of chlorinated solvents in Low Permeability Subsurface Zones [D]. Michigan: University of Michigan, 2015.
- [8] TRZCINSKI J, WILLIAMS D J, ZBIK M S. Can hydrocarbon contamination influence clay soil grain size composition [J]. Applied Clay Science, 2015, 109: 49.
- [9] DERYA A. Impact of clay- DNAPL Interactions on the transport of chlorinated solvents in low permeability subsurface zones [D]. Michigan: University of Michigan, 2015.
- [10] 周杏,蔡奕,孙明楠.柴油污染对上海地区粉质黏土工程性质影响的试验研究[J].工程勘察,2015, 43(3): 1.
ZHOU Xing, CAI Yi, SUN Mingnan. Experimental study on engineering properties of silty clay contaminated by diesel oil in Shanghai [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(3): 1.
- [11] 徐天宇.生活源污染质渗流—化学协同作用下土体性质结构研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
XU Tianyu. Research on the properties and structures of silty clay under the seepage-chemistry Synergistic Effect by Life Source pollutants[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [12] BOWDERS J J. The influence of various concentrations of organic liquids on the hydraulic conductivity of compacted clay [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 1985.
- [13] CANDELARIA L M, MATSUMOTO M R. Effects of NAPL contaminants on the permeability of a soil bentonite slurry wall material [J]. Transport in Porous Media, 2000, 38(1):43.
- [14] DUNN R J, MITCHELL J K. Fluid conductivity testing of fine-grained soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(11):1648.
- [15] FERNANDEZ F, QUIGLEY R M. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. [J]. Canada Geotechnical Journal, 1985, 22(2):205.
- [16] FERNANDEZ F, QUIGLEY R M. Viscosity and dielectric constant controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water-soluble organics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3):582.
- [17] FERNANDEZ F, QUIGLEY R M. Controlling the destructive effects of clay - organic liquid interactions by application of effective stresses [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(3):388.
- [18] 高彦斌,张松波,李韬,等.饱和黏性土中重质非水相有机污染物纵向迁移数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2020, 48(1):24.
GAO Yanbin, ZHANG Songbo, LI Tao, *et al.* Numerical analysis of vertical migration of dense nonaqueous-phase liquids in saturated clay [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(1):24.