

Experimental Study on Permeability of Shanghai Clay under the Action of Alcohol

Xiaoming Tang, Yanbin Gao*

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 302529202@qq.com, yanbin_gao@tongji.edu.cn

Received: Feb. 20th, 2020; accepted: Mar. 5th, 2020; published: Mar. 12th, 2020

Abstract

The effects of alcohol infiltration on undisturbed and remolded clay in Shanghai on soil permeability characteristics were studied, and the effect of soil skeleton structure on the change of permeability coefficient of alcohol-cohesive soil was analyzed. The results show that: the penetration of alcohol into the clay soil, the decrease of the dielectric constant will reduce the surface charge density of the soil particles, and the compression of the diffusion electric double layer will increase the permeability of the clay soil, which will increase the permeability coefficient of the clay soil. The structure of the soil has a certain effect on the permeability change caused by the interaction of alcohol-cohesive soil. When the soil is a silty clay with relatively high porosity, the effect of alcohol on the soil permeability coefficient K is more significant, and K can increase ten times larger. When the pores of the soil are small and structurally strong, the structural changes caused by the alcohol-cohesive soil interaction will be inhibited and weakened to some extent, and the changes in permeability will be weakened accordingly. Destroying the natural skeleton structure of the soil can reduce the damage of the hydraulic conductivity of the clay to a certain extent. Therefore, in engineering practice (such as clay barriers directly below industrial and toxic waste storage ponds), studying the effect of organic solutions with lower dielectric constants (such as alcohol) on the permeability characteristics of clay soils requires attention to the soil's own skeleton structure. It is helpful to explore the interaction of soluble organic solutions in the process of migration in clay soil.

Keywords

Alcohol, Permeability, Clay, Soil Structure

酒精作用下上海黏性土渗透特性试验研究

汤小明, 高彦斌*

同济大学地下建筑与工程系, 上海

*通讯作者。

Email: 302529202@qq.com, yanbin_gao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020年2月20日; 录用日期: 2020年3月5日; 发布日期: 2020年3月12日

摘要

试验研究了酒精渗透上海原状和重塑黏性土对土体渗透特性的影响, 并分析了土体骨架结构对酒精-黏性土相互作用对渗透系数改变的影响。结果表明: 酒精渗透进入黏性土, 介电常数的降低会使土颗粒表面电荷密度降低, 扩散双电层压缩而提高了黏性土的透水性使, 使黏性土渗透系数增大。土的结构对酒精-黏性土的相互作用导致渗透性变化有一定的影响, 土体为孔隙比较高的淤泥质粉质黏土时, 酒精对土体渗透系数 K 影响更加显著, K 可增大十倍; 当土的孔隙较小, 结构性较强时, 酒精-黏性土相互作用导致的结构性变化会受到一定抑制而减弱, 渗透性的变化也会随之变弱。故而破坏土体天然骨架结构, 能一定程度降低酒精对黏性土水力传导性的破坏作用。因此在工程实践(如工业和有毒废物蓄积池正下方的黏土屏障)中, 研究介电常数较低的有机溶液(如酒精)对黏性土渗透特性的影响需要重视土体自身骨架结构, 这有助于探讨可溶性有机溶液在黏性土中的迁移过程中的相互作用。

关键词

酒精, 渗透特性, 黏性土, 土结构

Copyright © 2020 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

土体内孔隙水的渗流会导致许多工程问题, 在岩土工程中主要体现在渗流和渗流破坏, 故而土体中的渗流及渗透规律的研究一直是岩土工程学科领域的一个重要课题。国内外许多科研工作者基于水这一渗透流体, 对黏性土的渗透规律进行了大量研究, 发现影响土体渗透系数的原因主要来自于土本身的特性[1]、渗透流体性质和试验方法, 包括土粒大小、颗粒级配、土的孔隙比及饱和度、实验用水、水温及水的粘滞性等(Taylor [2], Tavenas [3], 付磊[4], 王媛[5])。

化学废物的安全处理成为重要的环境问题, 而危险废物的垃圾填埋场采用的双衬砌结构多为黏土衬砌, 关于黏性土渗透特性的试验研究中, 大部分研究人员测定土体渗透系数主要采用蒸馏水这一渗透流体。而在环境岩土中, 致污物质侵入土体, 使得土成分、结构和性质发生显著变异, 同时土体孔隙被这些可溶或者不可溶的致污物质全部或部分充满形成污染土, 实际渗透于土体中的流体多样。Abdul [6]用不同介电常数的有机溶剂(苯, 甲苯, 对二甲苯, 硝基苯, 三氯乙烯, 四氯乙烯, 乙酸乙酯, 2-丁酮和苯酚)及其水溶液渗入膨润土和高岭土进行了渗透实验室研究, 发现有机水溶液和水测得的土体渗透系数差别很小。但是纯有机溶剂使得高岭土和膨润土的渗透系数增加了两个数量级。这是由于水溶液不改变粘土的物理外观, 表面疏水性更高的溶剂会使粘土收缩, 从而产生明显的大垂直裂纹。亲水性溶剂通常会使得粘土聚集并破裂, 形成裂缝网络。Kaya [7]在此基础上用有机液体代替孔隙流体进行试验研究, 发现细颗粒土壤的性质(如水力传导率)会随着孔隙流体的介电常数发生显著变化, 随着孔隙流体介电常数接近土壤的介电常数, 排斥力和吸引力逐渐减小。但总体引力净增加, 导致颗粒趋于絮凝并形成聚集体从而导致有效流动面积的净增加, 从而导致水力传导率的增加。

有机溶液的介电常数(例如酒精的介电常数为 25.7)一般比水(介电常数为 81.5)低, 当介电常数低的有机流体代替水渗透土体时, 质子电荷的减少, 土壤的阳离子交换容量(CEC)随着孔隙流体介电常数的降低而降低, 导致扩散双层的压缩和(或)表面电荷密度的降低, 增加土的稳定性和减少膨胀性, 提高土的强度, 更重要的是, 扩散双层的压缩会提高黏性土的透水性。目前国内在化学溶液对黏性土的渗透特性影响的研究中, 主要集中在酸、碱、盐和重金属对土体渗透性的影响方面[8], 相比于国外, 国内化学渗透黏性土的研究很少, 尤其在有机溶液渗透黏性土的试验研究方面比较缺乏。

东南沿海地区的浅部地层主要是由性质略有不同的饱和黏性土构成。而这些地区作为我国重要的工业基地, 各种化工厂应有尽有, 土体受各种化学溶液污染的现象非常普遍。酒精作为一种典型的可溶性有机溶剂, 介电常数明显低于水, 所以研究酒精对上海黏性土渗透特性的影响有助于探讨可溶性有机溶液在土体迁移机理并为污染土的勘测评价积累经验, 对指导工程实践具有很重要意义。本文通过变水头试验, 分别监测蒸馏水和酒精在结构不同的上海第②③层原状黏性土中的渗透系数变化过程, 为了进一步研究土体天然结构对土体渗透酒精时渗透特性的影响, 将上海第③层天然黏性土在抽气密封袋中揉捏破坏其天然骨架结构, 保持土体孔隙比和含水率不变, 制得重塑黏性土进行变水头试验。对比分析研究酒精和土体骨架结构对上海黏性土渗透特性的影响, 为可溶性有机溶液在土体中的迁移机理研究积累经验。

2. 酒精溶液渗透试验方案

2.1. 试验土样与酒精溶液

上海地区浅层黏土具有明显的特点: ②层为褐黄色黏土, 具有明显的铁锈斑, 其成分为氧化铁及铁锰结核物, 呈可塑-软塑状, 具有一定硬度; ③层为灰色淤泥质粉质黏土, 土质不均匀, 局部夹砂, 呈流塑状态。试验所用土样均取自在建的某地铁站, 土样参数如表 1 所示, 这三种土样均为黏性土, ②层天然黏土的孔隙较小且结构致密, ③层的天然淤泥质粉质黏土孔隙较大, 呈絮凝状结构, ③层的重塑淤泥质粉质黏土天然机构则被完全破坏, 为分散性结构。

Table 1. Test soil sample parameters

表 1. 试验土样参数

取土深度 (m)	土层特征	天然含水率 w (%)	孔隙比 e	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
2.5~2.8	该层土为褐黄色黏土, 具有明显的铁锈斑, 其成分为氧化铁及铁锰结核物, 呈可塑-软塑状, 也是上海地区主要污染和污染隔离层, 土体致密, 呈可塑-软塑状。	29.43	0.8	39.6	15.1	24.5	0.585
9.0~9.3	该层土为灰色淤泥质粉质黏土, 土质不均匀, 局部夹砂, 呈流塑状态, 絮凝状结构。	43.08	1.17	39.5	21.6	17.9	1.195
9.0~9.3	破坏了土层天然骨架结构, 为灰色淤泥质粉质黏土, 呈流塑状态, 分散型结构。	43.08	1.17	39.5	21.6	17.9	1.195

试验渗透流体为: 0.01 N 的 CaSO_4 溶液作为渗透水溶液测定其本身渗透系数; 浓度为 99.7% 的分析纯酒精作为可溶性有机渗透溶液。

2.2. 试验设备与方案

试验采用 TST-55 型渗透仪, 玻璃质的变水头管截面积 $a = 0.2826 \text{ cm}^2$, 试样断面积 $A = 30 \text{ cm}^2$, 试样

高度即渗径 $L = 4 \text{ cm}$ 。分别用蒸馏水和液态碳氢化合物酒精在原状和重塑的上海黏性土中测得土样渗透系数变化过程, 对数据分析对比。

1) 切取土样;

2) 在变水头管中用 0.01 N 的 CaSO_4 溶液测得稳定的渗透系数, 即渗透酒精前测得土体本身的渗透系数 K_1 ;

3) 在变水头管中充入浓度为 99.7% 的分析纯酒精, 并在变水头管顶端用带细孔的保鲜膜覆盖最大程度减少酒精的挥发, 测定土样在酒精渗透情况下渗透系数 K_2 的变化过程直至渗透系数稳定或者试验时间达到 96 小时 ;

4) 再次渗透水的到酒精渗透后的渗透系数 K_3 。

3. 试验结果及分析

试验的渗透系数反应的是不同时刻对应的渗透情况, 故采用某一时间段的水头变化来计算该时间段的平均渗透系数, 计算公式采用:

$$K = 2.3 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

式中 a 为变水管截面积, 取值为 0.2826 cm^2 ; L 为渗径即土样高度, 取值为 4 cm ; A 为环刀试样的断面积, 取值为 30 cm^2 ; h_1 为某一时刻 t_1 对应的水头高度, h_2 为某一时刻 t_2 对应的水头高度; t 为 t_1 与 t_2 的时间差, 即 $t = t_2 - t_1$ 。

3.1. 原状土试验结果分析

变水头测定土体渗透系数时, 初步渗透时间短且变水头处于最高点, 渗透液未完全贯通整个土样, 故而在开始阶段均出现瞬时渗透系数较大, 开始测得的渗透系数并不能反应土体真实渗透特性, 这个现象与 Fernade [9] 在利用不同导电率溶液渗透时均有出现。

用水渗透上海第②层的天然黏性土, 得到的渗透流量随时间的变化如图 1 所示, 对应计算的渗透系数结果如图 2 所示: 试验开始渗透水时得到的渗透系数为 $2.06 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 后逐步稳定测得上海第②层天然黏性土的渗透系数 $K_1 = 2.60 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。后继续在该土样基础上, 渗透浓度 99.7% 的酒精, 渗透系数对比渗透水时出现小幅增大, 后稳定在 $K_2 = 4.53 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。后继续在该土样的基础上, 用变水头试验, 渗透水来校验其渗透系数, 同时检验酒精和水的粘滞度对土体渗透系数的影响, 测得其渗透系数稳定在 $K_3 = 4.50 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 可知水和酒精两种溶液的粘滞度对土体渗透系数的影响极其微小。

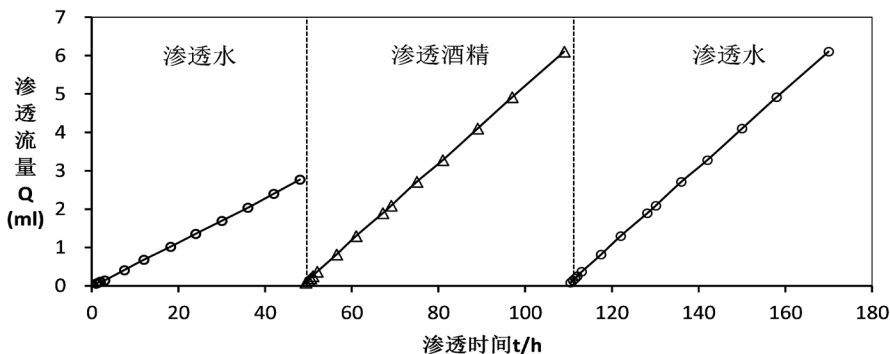


Figure 1. Percolation flow of natural clay soil in the second layer of Shanghai
图 1. 上海第②层天然黏性土渗透流量

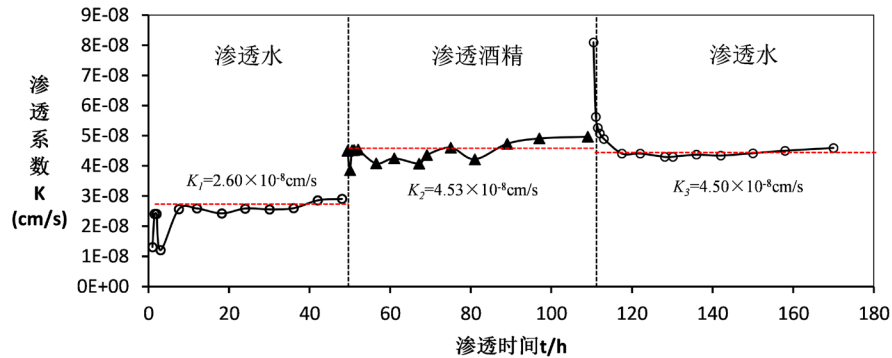


Figure 2. Permeability results of the second layer of natural clay in Shanghai
 图 2. 上海第②层天然黏性土渗透系数

Mesri [10]等提出, 渗透系数主要受机械效应特别是空隙尺寸的分布和通道曲折度的影响, 如果流动通道由许多小通道和相对较少的大通道组成, 则可以使渗透系数最大化, 通过该通道可以产生主流。同时物理化学变量通过影响粘土颗粒的分散或聚集而对渗透系数产生很大的影响。通过上海第②层天然黏性土渗透试验结果可知, 浓度 99.7% 的酒精渗透进入土体时, 渗透系数只是出现的大概一倍的增大, 还是处于 10^{-8} cm/s 这一数量级, 并没有出现大幅度变化。上海地区第②层天然黏性土具有明显的特点, 为褐黄色黏土, 具有明显的铁锈斑, 其成分为氧化铁及铁锰结核物, 呈可塑 - 软塑状, 具有一定硬度, 工程力学性质较好, 工程设计中均对该硬壳层加以利用, 作为基础持力层。在保持土体天然骨架结构时, 有机溶液酒精对上海第②层天然黏性土粘土颗粒的分散和聚集影响很小, 导致渗透系数的变化不大。

用水渗透上海第③层深度为 9.0~9.3 m 的天然淤泥质粉质黏性土, 得到的渗透流量随时间的变化如图 3 所示, 对应计算的渗透系数结果如图 4 所示: 试验开始渗透水时得到的渗透系数逐步稳定在 $K_1 = 1.98 \times 10^{-8}$ cm/s。后继续在该土样基础上, 渗透浓度 99.7% 的酒精, 渗透系数对比渗透水时出现增大, 从开始的 1.46×10^{-8} cm/s 后稳定在 $K_2 = 1.24 \times 10^{-7}$ cm/s, 对比渗透水增大约 10 倍。后继续在该土样的基础上, 用变水头试验, 渗透水来校验其渗透系数, 同时检验酒精和水的粘滞度对该土体渗透系数的影响, 测得其渗透系数稳定在 $K_3 = 1.34 \times 10^{-7}$ cm/s, 可知水和酒精两种溶液的粘滞度这个因素对上海第③层天然黏性土渗透系数测定的影响极其微小。综合该土样的渗透结果可知酒精渗透能够很大程度改变土体渗透特性, 渗透系数提升一个数量级后保持稳定。这可能酒精渗透进入灰色淤泥质粉质黏土, 酒精(25.7)的介电常数相对于水(81.5)要低, 导致扩散双层的压缩, 表面电荷密度的降低, 扩散双层的压缩提高淤泥质粉质黏土的透水性。但该黏性土孔隙较小, 结构性较强, 酒精对黏性土的作用使其渗透系数增大但不显著。

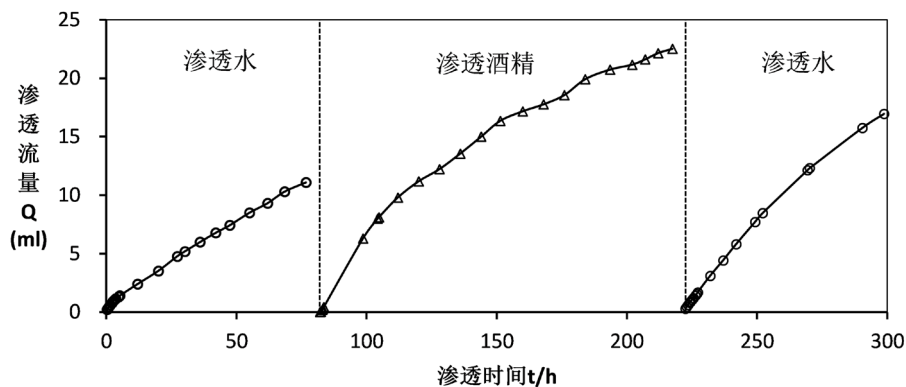


Figure 3. Seepage flow of natural clay soil in the third layer of Shanghai
 图 3. 上海第③层天然黏性土渗透流量

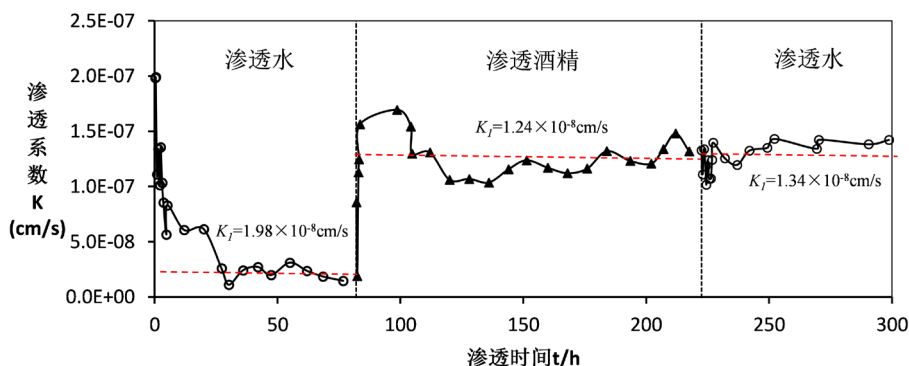


Figure 4. Permeability results of the third layer of natural clay in Shanghai
图 4. 上海第③层天然黏性土渗透系数

在对上海第②③层天然黏性土的渗透试验中, 土体天然骨架结构并未破坏。酒精渗透第②层天然黏性土, 使渗透系数 K 略微增加; 第③层天然黏性土同样存在结构性, 但淤泥质粉质黏土孔隙较大, 结构性强度不如第②层天然黏性土, 在有机溶液酒精的作用下, 渗透系数 K 增加较大, K 值的增加可达一个数量级。为了进一步研究土体天然结构对土体渗透酒精时渗透特性的影响, 将上海第③层天然黏性土在抽气密封袋中揉捏破坏其天然骨架结构, 保持土体孔隙比和含水率不变, 制得重塑黏性土进行变水头试验。

3.2. 重塑土试验结果分析

Mitchell [11] 1976 年提出, 天然软黏土具有的结构性是土层在沉积过程中形成颗粒和孔隙大小、形状、排列以及它们之间的接触和联结关系的总和, 并可细分为胶结和组构两部分。陈波[12]等对上海软黏土原状样和不同制样方式得到的重塑样、泥浆样和压实样开展压缩试验和压汞试验来研究结构性对软黏土的变形特性的影响, 发现不同的制样方式得到的孔径分布曲线存在着较大的差异, 这种差异不会随着固结压力的增大而完全消除。

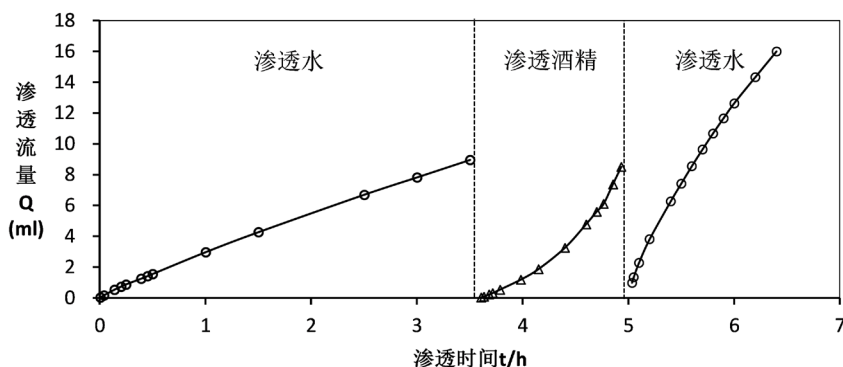


Figure 5. Seepage flow of remodeled clay soil in the third layer of Shanghai
图 5. 上海第③层重塑黏性土渗透流量

用水渗透上海第③层重塑淤泥质粉质黏土, 得到的渗透流量随时间的变化如图 5 所示, 对应计算的渗透系数结果如图 6 所示: 试验开始渗透水时得到的渗透系数逐步稳定在 $K_1 = 6.30 \times 10^{-7}$ cm/s。后继续在该土样基础上, 渗透浓度 99.7% 的酒精, 渗透系数对比渗透水时出现增大, 从开始的 7.20×10^{-7} cm/s 后稳定在 $K_2 = 3.59 \times 10^{-6}$ cm/s。后继续在该土样的基础上, 用变水头试验, 渗透水来校验其渗透系数, 同时检验酒精和水的粘滞度对该重塑土体渗透系数的影响, 测得其渗透系数稳定在 $K_1 = 3.46 \times 10^{-6}$ cm/s, 与酒精渗透时稳定渗透系数基本一致。综合该土样的渗透结果可知酒精渗透能够较大幅度改变土体渗透

特性, 渗透系数提升约 5 倍, 酒精对该重塑土渗透特性得影响强度介于上海第②③层天然黏性土。该结果表明, 破坏土体上海第③层淤泥质粉质黏土得天然结构, 改变土体孔隙分布, 会一定程度上改变土体渗透特性, 使其渗透系数出现降低, 但渗透酒精时由于酒精介电常数较水低, 导致扩散双层的压缩, 表面电荷密度的降低, 扩散双层的压缩提高淤泥质粉质黏土的透水性, 重塑淤泥质粉质黏土在酒精作用下总体渗透系数增大, 但增大幅度小于原状淤泥质粉质黏土。

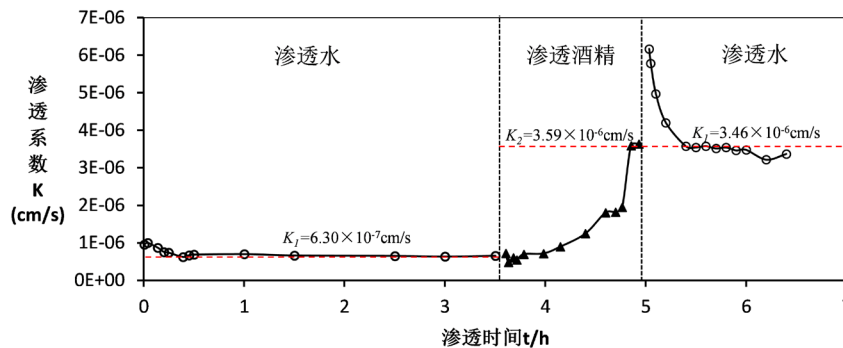


Figure 6. Permeability results of the third layer of remolded clay in Shanghai
图 6. 上海第③层重塑黏性土渗透试验结果

4. 结论

论文对上海第②层天然黏土、第③层天然淤泥质粉质黏土、第③层重塑淤泥质粉质黏土进行变水头试验, 在同一土样中依次渗透水、浓度 99.7% 的酒精、水来测定渗透系数, 分析酒精渗透黏性土时, 对不同种类和不同结构土体水力传导性的影响, 得出如下结论:

1) 对于孔隙比较小、结构性较强的上海第②层天然黏土, 酒精渗透土体对其水力传导性的影响很小, 仅使其渗透系数略有增加, 大概增加 1 倍;

2) 对于孔隙比较大、结构性较弱上海第③层天然淤泥质粉质黏土, 酒精渗透进入土孔隙导致土颗粒表面电荷密度的降低, 扩散双层压缩, 提高淤泥质粉质黏土的透水性, 可使渗透系数增大一个数量级;

3) 酒精渗透进入淤泥质粉质黏土, 试验表明重塑土和原状土的渗透系数均会显著提高, 提高的程度不同, 但是原因目前是不明确的, 结构的破坏对酒精 - 黏性土对水力传导性的影响尚需进一步研究。

黏性土的渗透特性受渗透溶液的介电常数影响较大, 用介电常数比水低的酒精渗透土体时, 土颗粒表面电荷密度降低, 扩散双层压缩而提高了黏性土的透水性。但是土的结构对酒精 - 黏性土的相互作用导致渗透性变化有一定的影响, 当土的孔隙较小, 结构性较强时, 酒精 - 黏性土相互作用导致的结构性变化会受到一定抑制而减弱, 渗透性的变化也会随之变弱。

基金项目

自然科学基金项目(41772293)。

参考文献

- [1] 顾中华, 高广远, 王结虎. 结构性对上海软土渗透系数影响的试验研究[J]. 探矿工程 - 岩土钻掘工程, 2004, 31(5): 1-3.
- [2] Taylor, D.W. (1948) Fundamentals of Soil Mechanics. *Soil Science*, **66**, 161. <https://doi.org/10.1097/00010694-194808000-00008>
- [3] Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., et al. (1983) The Permeability of Natural Soft Clays. Part II: Permeability Characteristics. *Canadian Geotechnical Journal*, **20**, 645-660. <https://doi.org/10.1139/t83-073>

-
- [4] 付磊, 闫迪, 黄强, 等. 黏粒含量对黏性土渗透性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017(30): 285-289.
- [5] 王媛, 施斌, 高磊, 等. 黏性土渗透性温度效应实验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 351-356.
- [6] Abdul, A.S., Gibson, T.L. and Rai, D.N. (1990) Laboratory Studies of the Flow of Some Organic Solvents and Their Aqueous Solutions through Bentonite and Kaolin Clays. *Ground Water*, **28**, 524-533. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01708.x>
- [7] Kaya, A. and Fang, H.Y. (2000) The Effects of Organic Fluids on Physicochemical Parameters of Fine-Grained Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 943-950. <https://doi.org/10.1139/t00-023>
- [8] 席永慧, 冯世进. 粘质土壤的膜性能研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 187-191.
- [9] Fernandez, F. and Quigley, R.M. (1985) Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. *Canadian Geotechnical Journal*, **22**, 205-214. <https://doi.org/10.1139/t85-028>
- [10] Mesri, G. and Olson, R.E. (1971) Mechanisms Controlling the Permeability of Clays. *Clays and Clay Minerals*, **19**, 151-158. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1971.0190303>
- [11] Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- [12] 陈波, 孙德安, 高游, 李健. 上海软黏土的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2523-2530.