

黏土渗透性温度效应试验

何俊, 胡晓瑾, 颜兴, 万娟

(湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:采用改造的 GDS 全自动环境岩土渗透仪(柔性壁)和南 55 渗透仪(硬性壁)开展渗透试验,研究温度和试验方法对黏土渗透系数的影响。结果表明:黏土的渗透系数随温度的升高而增大,渗透系数对数值与温度线性正相关,当温度从 20℃ 升高至 70℃ 时,柔性壁和硬性壁渗透试验结果增幅分别为 5.5 倍和 2.7 倍。由于两种渗透试验中试样尺寸和制样方法等差异,柔性壁渗透试验所得渗透系数大于相应干密度下硬性壁渗透试验结果。仅考虑流体黏滞系数和密度随温度的变化(即假设固有渗透率为定值)时,渗透系数估算值随温度的变化规律与实测结果一致,渗透系数随温度的变化主要由流体物理性质的变化引起;但渗透系数估算值与实测值有一定差异,固有渗透率并不是定值。柔性壁渗透试验 55 kPa 围压下所得固有渗透率随温度的升高而显著增大,渗透系数估算值小于实测值;而硬性壁渗透试验所得固有渗透率随温度的升高略有降低,渗透系数估算值与实测值相差不大。

关键词:温度效应;渗透系数;固有渗透率;柔性壁渗透试验;硬性壁渗透试验

中图分类号:TU521.3;TU502 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)03-0055-06

Experiments on temperature effect of hydraulic conductivity of compacted clay//HE Jun, HU Xiaojin, YAN Xing, WAN Juan (*College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

Abstract: The hydraulic conductivities of compacted clay at various temperatures were tested with different methods, the improved GDS full-automatic geoenvironmental permeameter (with a flexible wall) and Nan-55 permeameter (with a rigid wall). Results show that the hydraulic conductivity increased with temperature, and they were positively linearly related in a semi-logarithmic plane; the rates of increase of hydraulic conductivity from tests with a flexible wall and rigid wall were, respectively, up to 5.5 and 2.7 times higher at 70℃ than at 20℃. The hydraulic conductivity obtained from the GDS permeameter was larger than that obtained from the Nan-55 permeameter under the same dry density, due to different sample sizes and preparation methods in the two hydraulic tests. Assuming that the viscosity and density changed with temperature, while, the intrinsic permeability of compacted clay was invariable, the estimated hydraulic conductivity varying with temperature agreed with measured results, implying that the change in fluid properties contributed greatly to the increase of the hydraulic conductivity. However, there were certain differences between estimated and measured results of hydraulic conductivity, because the intrinsic permeability changed with temperature in real conditions. For the sample at a confining pressure of 55 kPa, the intrinsic permeability obtained from the GDS permeameter increased significantly with temperature, and the estimated hydraulic conductivity was larger than measured results; while, the intrinsic permeability obtained from the Nan-55 permeameter decreased slightly with the increase of temperature, and there was little difference between the estimated and measured results of hydraulic conductivity.

Key words: temperature effect; hydraulic conductivity; intrinsic permeability; flexible-wall hydraulic test; rigid-wall hydraulic test

压实黏土是垃圾填埋场、工业固体废弃物堆场中常用的防渗衬垫材料,首先必须满足低渗透性要求。在垃圾填埋场中,由于有机物降解产生的热能,填埋场内衬垫系统的温度一般为 50~60℃,最高可达 90℃ 以上,持续时间可超过 10 a^[1]。因此,压实黏土衬垫可能长期处于高温环境中,其渗透性能与常

温相比可能存在差异。国外学者对高温影响下衬垫系统性能开展的研究表明,高温对土工膜的老化^[2]、膨润土防水毯的水化膨胀及渗透性^[3-5]、黏土衬垫中干燥裂隙的扩展^[6]等都有重要影响。近年来,对黏土工程性质的温度效应研究受到越来越多的国内学者的重视,在热岛效应问题^[7]、核废料处

置与贮存时压实膨润土等材料性质的温度效应^[8]、土体热固结或非等温固结问题^[9]等方面取得了一定的成果。然而,由于黏土渗透性温度效应的复杂性,仍有很多问题没有研究清楚,主要表现在黏土渗透性随温度变化的机理和测试方法的影响两个方面。

一般认为,渗透系数可以表示为^[10]

$$k = K \frac{\rho g}{\mu} = K \frac{g}{\eta} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数, m/s ; K 为固有渗透率, m^2 ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为流体黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η 为动力黏滞系数, m^2/s ; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 。当假定土的固有渗透率为定值时,渗透系数就只与动力黏滞系数有关,据此可进行渗透系数的温度修正。我国SL237—1999《土工试验规程》中将 20°C 作为标准温度,即要将渗透试验结果换算到标准温度下的值:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2)$$

式中: k_T 、 k_{20} 分别为试验温度和标准温度时的渗透系数; η_T 、 η_{20} 分别为试验温度和标准温度时的动力黏滞系数。然而,温度对黏土渗透性的影响不仅与孔隙水的动力黏滞系数有关,还可能与土的矿物成分、微观结构及溶液中离子浓度和种类有关。邵玉娴等^[7]认为,温度升高时产生的吸附结合水量的变化是导致渗透系数增大的主要原因。Abuel-Naga等^[11]研究了软黏土在高温下的工程性质,发现用公式(2)估算的渗透系数与实测值有很好的—致性。Cho等^[5]对饱和钙基膨润土的研究发现,渗透系数随温度的变化主要由水黏滞系数的变化引起;而Ye等^[8]对压实高庙子膨润土的研究则表明,仅考虑水黏滞性变化的渗透系数理论估算值与实测值存在一定差异,且温度越高,实测值超出估算值越明显。可以看出,渗透系数与温度的关系是否符合公式(2)还有待于深入研究。

考虑温度的渗透系数研究方法主要有间接方法(根据土体孔隙水体积变化或固结压缩曲线得到)和直接方法(包括硬性壁渗透试验和柔性壁渗透试验)两种。白冰等^[9]认为,由于温度升高时产生热固结导致黏性土的孔隙比发生变化,故根据等温固结试验来间接确定黏性土渗透系数的方法值得商榷。Delage等^[12]对Boom黏土渗透性的温度效应研究也发现,利用固结试验结果反推渗透系数产生的误差较大。因此,更多的学者采用硬性壁渗透试验方法进行研究,如Morin等^[13]在刚性固结环内对海洋沉积物进行了不同温度下的常水头渗透试验;邵玉娴等^[7]采用南55渗透仪对三种黏性土进行了不同温度下的变水头渗透试验;Cho等^[5,8]采用硬性壁

渗透试验方法研究了不同温度下压实膨润土的渗透性,试验土样的干密度保持不变。在柔性壁渗透试验方面,Abuel-Naga等^[11]采用柔性壁渗透仪对软黏土进行了不同温度下的常水头渗透试验。柔性壁渗透试验和硬性壁渗透试验在试样尺寸、制样方法、侧壁渗透和渗透过程中孔隙比的变化等方面均存在不同,目前对于不同温度条件下两种试验方法差异的研究还不多。

本文以填埋场中常用的黏土衬垫材料为研究对象,在GDS全自动环境岩土渗透仪(柔性壁)和南55渗透仪(硬性壁)基础上增加温度控制设备,开展不同温度条件下黏土的渗透试验,研究黏土衬垫渗透性能随温度的变化规律及机理,探讨两种试验方法的差异,以期揭示温度作用下黏土的渗透性能提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验土样选自武汉市长山口垃圾填埋场附近,其液限和塑限分别为39.7%和25.3%,为低液限黏土。采用标准普氏击实试验方法,得到该黏土的最优含水率为23.0%,最大干密度为 1.61 g/cm^3 。其比表面积为 $31.94 \text{ m}^2/\text{g}$,主要黏土矿物为高岭石和伊利石。

1.2 柔性壁渗透试验

柔性壁渗透试验采用GDS全自动环境岩土渗透仪。为控制温度,对该渗透仪围压室进行改造:将铜管绕成螺旋状安装到围压室内部,铜管经PVC管连接到恒温水浴,恒温水通过PVC管和螺旋铜管循环流动,从而使压力室中的水和土样处于恒温状态。围压室顶端连接温度传感器监控其温度。围压室用珍珠棉镀铝隔热膜包裹,以减小热量散失。实验装置如图1(a)所示。



(a) 柔性壁渗透仪



(b) 硬性壁渗透仪

图1 控制温度的渗透仪试验装置

渗透仪可选用恒定水头和恒定流速两种模式,本文采用恒定水头模式,上游和下游压力分别设为 50 kPa 和 0 kPa 。设定围压为 55 kPa ,试验温度为室温至 70°C 。试验时,取过筛烘干土,控制含水率为

最优含水率+2.0% (即 25.0%), 压实度大于 96% (选用干密度为 1.57 g/cm^3), 分 3 层击实, 土样直径和高度分别为 70 mm 和 140 mm, 抽真空饱和。装样后, 先通过水浴控制围压室和土样的温度达到设定温度, 此时围压室及上下游均与大气连通; 接着施加围压固结 24 h; 然后施加上下游压力, 按照室温、 20°C 、 35°C 、 50°C 和 70°C 的顺序进行渗透试验。

1.3 硬性壁渗透试验

硬性壁渗透试验采用南 55 渗透仪。为考虑不同温度的影响, 将渗透仪的水槽改成水浴 (图 1(b))。为使进入土样中的水温达到设定温度, 水浴中的水管需具有良好的导热性能和足够的长度。选择白色 PVC 管进行测试, 发现在 60 min 内管中的水温能与水浴中的温度达到平衡 (见图 2, 其中水浴温度设置为 50°C , 由于测量时受环境温度影响, 测试温度低于实际温度)。本次试验土样及水头条件下, 测管内水位最大下降值不超过 10 cm/h , 选用 1 m 长的 PVC 管浸入水浴中将测管与土样连接, 其长度足够使进入土样中的水的温度与水浴中的温度平衡。

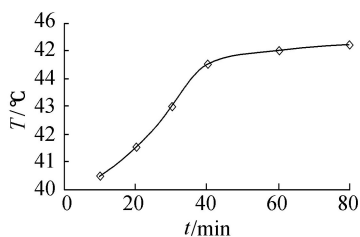


图 2 PVC 管内水温与浸泡时间的关系

硬性壁渗透试验采用静压法制样, 直径和高度分别为 61.8 mm 和 40 mm, 土样干密度选为 1.60 g/cm^3 , 其制备及饱和方法与柔性壁渗透试验相同。

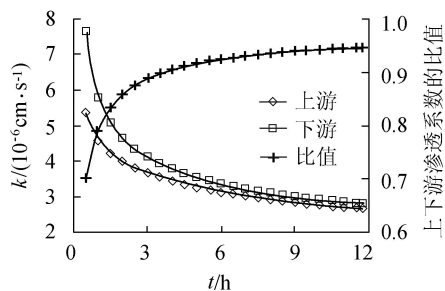
2 试验结果

2.1 渗透系数与时间的关系

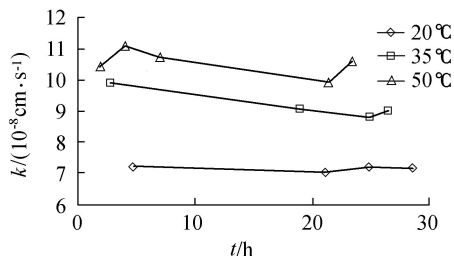
图 3 为两种试验方法得到的渗透系数与时间的关系曲线。可以看出, GDS 柔性壁渗透试验中, 由于围压的作用使土样逐渐趋于密实, 根据上下游流量得到的渗透系数均随时间逐渐减小, 上游与下游渗透系数的比值逐渐趋于 1。该结果与文献 [11] 得到的结果相同。由于 GDS 柔性壁渗透试验结果与时间有关, 选定满足上下游渗透系数比值接近 1、平均渗透系数随时间变化趋于稳定时的值进行分析。南 55 硬性壁渗透试验过程中土样的干密度保持不变, 渗透系数并没有表现出随时间逐渐减小的趋势, 故取均值分析。

2.2 渗透系数与温度的关系

图 4 为柔性壁和硬性壁渗透试验得到的渗透系数与温度的关系。由于高温不太容易控制, 比如发生



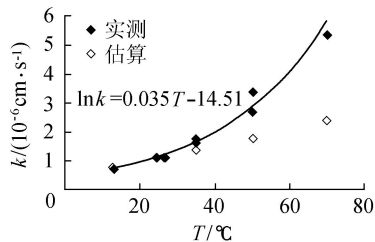
(a) 柔性壁渗透试验 (温度 50°C)



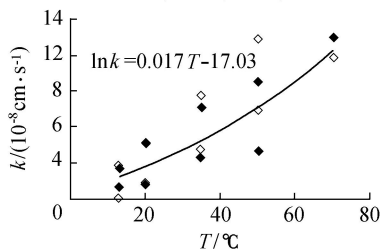
(b) 硬性壁渗透试验

图 3 渗透系数与时间的关系

乳胶膜及橡皮圈变软或破裂、水浴中水分蒸发较快等现象, 故不是所有情况下都得到 70°C 的试验结果。



(a) 柔性壁渗透试验



(b) 硬性壁渗透试验

图 4 渗透系数与温度的关系

a. 两种试验方法所得的结果具有相同的规律, 即黏土的渗透系数随着温度的升高均表现出增大的趋势。从 20°C 到 70°C , 柔性壁渗透试验所得结果的最大增幅为 5.5 倍, 硬性壁渗透试验所得结果的最大增幅为 2.7 倍。

b. 渗透系数的对数值与温度呈较好的线性正相关关系。柔性壁渗透试验所得斜率大于硬性壁渗透试验结果 (分别为 0.035 和 0.017)。

c. 柔性壁渗透试验土样的初始干密度约为 1.57 g/cm^3 , 在 55 kPa 围压下土样发生固结压缩, 渗透试验完成后土样干密度约为 1.60 g/cm^3 , 与硬性壁渗透试验中干密度为 1.60 g/cm^3 的土样相当。柔性壁渗透试验结果显著大于硬性壁渗透试验结

果,在 13 ~ 70℃ 范围内,柔性壁渗透试验结果约为相应温度下硬性壁渗透试验结果的 13 ~ 26 倍。

2.3 固有渗透率与温度的关系

根据试验所得渗透系数,由式(1)可计算出固有渗透率(即 $K=k\eta/g$),其与温度的关系见图 5,其中不同温度下流体密度及黏滞系数根据文献[4]选用或线性插值确定(见表 1)。固有渗透率是表征土本身传导流体能力的参数,其大小与界面物理化学性质、孔隙特性、颗粒大小及排列方式等因素有关,而与流体性质无关。可以看出,当温度变化时,固有渗透率并不是一个常数,固有渗透率的对数值与温度之间有较好的线性相关性,与 Ye 等^[8]的试验结果一致。柔性壁渗透试验所得固有渗透率随温度增大而显著增大,硬性壁渗透试验所得固有渗透率随温度的升高略有减小。

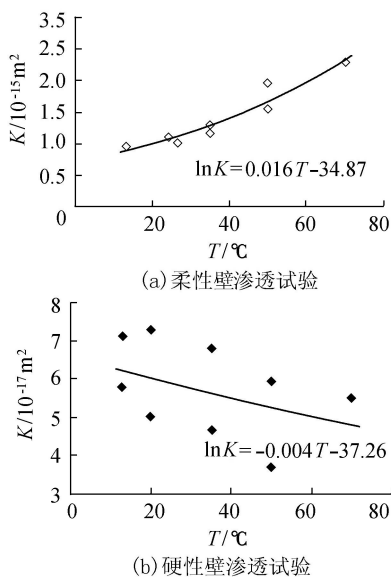


图 5 固有渗透率与温度的关系

表 1 试验温度下水的性质参数^[4]

温度/ ℃	黏滞系数/ ($10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度/ ℃	黏滞系数/ ($10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
10	1.3070	999.70	40	0.6532	992.22
20	1.0020	998.20	50	0.5470	988.00
30	0.7977	995.65	70	0.4040	977.78

3 讨论

3.1 渗透系数及固有渗透率的温度效应机理

黏土渗透系数随温度的变化可能受流体的物理性质、土颗粒与流体之间的物理化学作用、孔隙结构与尺寸等三方面因素的影响。

3.1.1 流体的物理性质

温度对流体物理性质的影响,主要是流体的黏滞系数和密度等随温度而变化。当渗透系数与温度的关系仅考虑黏滞系数和密度的变化时,即假设固

有渗透率为常数时,则可用 20℃ 时的渗透系数估算其他温度下的渗透系数(由式(2)可得 $k_T = k_{20} \frac{\eta_{20}}{\eta_T}$),所得估算结果见图 4。可以看出,渗透系数估算值随温度的变化规律与实测结果是一致的,即随温度的升高而增大,这表明渗透系数随温度的变化主要是由流体物理性质的变化引起的。硬性壁渗透试验估算值与实测值的差异相对较小;但是柔性壁渗透试验估算值明显小于实测值,且温度越高二者的差异越大,70℃ 时估算值约为实测值的 40%。事实上,固有渗透率是随温度变化的(图 5)。因此,温度对渗透系数的作用除了流体物理力学性质外,还需考虑其他因素的影响。

3.1.2 土颗粒与流体之间的物理化学作用

当温度发生变化时,土颗粒与流体之间的物理化学作用可能导致的扩散双电层的厚度随之变化。有研究认为温度的改变对双电层的厚度以及吸附水量没有显著的影响^[14];但也有学者认为当温度升高时部分吸附结合水变为自由水,吸附结合水量减小,导致吸附双电层厚度变小,流动通道变大,从而导致渗透系数变化大于估算值、固有渗透率随温度的升高而增大^[15]。邵玉娴等^[7]对 3 种黏性土的吸附结合水试验发现,当温度从 5℃ 增大至 50℃ 时,吸附结合水量减小 3.78% ~ 10.01%。本文采用与文献[7]相同的容量瓶法进行测量,利用水浴控制温度,测量出吸附结合水量与温度的关系如图 6 所示。可以看出,吸附结合水量随温度的升高而减小,当温度从 20℃ 增大至 70℃ 时,吸附结合水量从 4.76% 减小至 3.83%。

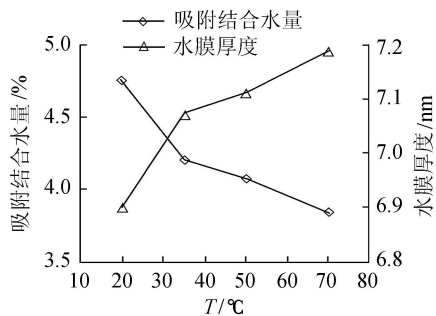


图 6 吸附结合水量及水膜厚度与温度的关系

对于干密度为 1.60 g/cm^3 的土样,其饱和含水率约为 26.8%。若假设土颗粒和孔隙为均匀分布,根据含水率和比表面积可以推求出总水膜厚度约为 8.39 nm。根据吸附结合水量也可计算出吸附结合水膜的厚度,总水膜厚度与吸附结合水膜厚度之差即为渗透结合水及自由水(即水流动的通道)的厚度(图 6)。可以看出,当温度从 20℃ 增大至 70℃ 时,水流动通道的水膜厚度从 6.90 nm 增大至 7.19 nm,这

表明,在土颗粒与孔隙均匀分布的假设条件下,由于吸附结合水量的变化导致水流动通道随温度的升高而增大,此时固有渗透率应随温度的升高而增大,渗透系数实测值应大于估算值。但本文测试结果并不完全是这样。另外,文献[7]中3种黏性土的硬性壁渗透试验结果见图7,可以看出,土样2的固有渗透率随温度的升高而增大,可以用结合水膜厚度的变化来解释;而土样1和土样3的固有渗透率却随温度的升高而减小。因此,从本文试验结果和文献[7]都可以得出,单从扩散双电层和吸附结合水膜厚度的变化还不能完全解释以上渗透系数和固有渗透率随温度的变化规律;而且以上结合水膜厚度的计算是在土颗粒和孔隙均匀分布的假设条件下得到的,还需从孔隙分布的不均匀性来考虑。

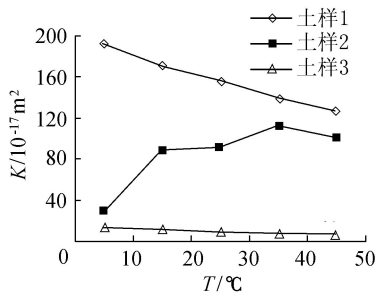


图7 固有渗透率与温度的关系^[7]

3.1.3 孔隙结构与尺寸

众所周知,黏性土颗粒具有团聚现象,其孔隙尺寸分布是不均匀的,存在粒间和粒内两种类型的孔隙,孔隙结构和尺寸可能受到温度的影响。Gee等^[16]研究发现,当温度升高时,黏土结合水的粒间黏性剪切阻力减小,可能导致整体结构的破坏,因此粒间孔隙度将减小。叶为民等^[17]对高压实膨润土-砂混合物微观结构的研究发现,当温度为20°C时,土样孔径分布为双峰结构,即存在大孔隙(粒间孔隙)和小孔隙(粒内孔隙);当温度为60°C时,土样大孔隙消失,只存在小孔隙。Abuel-Naga等^[3]对膨润土防水毯渗透性能的温度效应研究表明,当温度升高时,原有颗粒状膨润土发生分解,形成更多由凝胶态蒙脱石所占据的粒间孔隙和尺寸更小的粒间孔隙。虽然本文土样的主要黏土矿物不是蒙脱石,但在饱和状态下仍有部分分散的伊利石和高岭石颗粒占据粒间孔隙;当温度升高时,可能发生分散的黏土颗粒占据粒间孔隙以及粒间孔隙减小的现象,由此导致固有渗透率随温度的升高而减小。

固有渗透率随温度表现出增大或减小的规律,是粒间孔隙尺寸效应和结合水膜厚度效应的共同作用的表现。当结合水膜厚度效应更显著时,固有渗透率随温度的升高而增大;而当粒间孔隙尺寸效应

更显著时,固有渗透率随温度的升高而减小。当土样成分和结构不相同,两种效应的强弱不同,因此文献[7]及本文硬性壁渗透试验所得固有渗透率随温度的升高而表现出增大或减小的趋势。

3.2 两种试验方法比较

由图4可知,相同干密度下柔性壁渗透试验所得渗透系数大于硬性壁渗透试验的结果。造成这种差异的原因首先是土样尺寸和制样方法的不同,柔性壁渗透试验土样尺寸为直径70 mm、高度140 mm,采用分层击实法制样;硬性壁渗透试验土样尺寸为直径61.8 mm、高度40 mm,采用静压法制样。渗透系数的大小受到试样尺寸的影响,例如Rayhani等^[18-19]对直径100 mm、高度116 mm和直径300 mm、高度150 mm两种尺寸的土样进行柔性壁渗透试验发现,大尺寸土样渗透系数大于小尺寸土样渗透系数,二者的比值为2.0~3.6;Omidi等^[20]比较了直径分别为101.6 mm和430 mm土样的硬性壁渗透试验结果后发现,后者为前者的8.3~39.3倍。另外,相对于静压法制样,分层击实制样更容易造成不均匀及制样裂隙等现象,在低围压下这些现象不能完全消除,从而导致柔性壁渗透试验所得渗透系数大于相应条件下硬性壁渗透试验结果。

通常认为,硬性壁渗透试验可能存在侧壁渗漏现象,而柔性壁渗透试验可以较好地解决这个问题,在土样状态相同的情况下,硬性壁渗透试验结果大于柔性壁渗透试验结果。本文可能受到土样尺寸和制样方法的影响,没有发现侧壁渗漏引起的渗透系数变大现象。

对于硬性壁渗透试验,固有渗透率随温度的升高而略有减小(图5(b)),主要是由于粒间孔隙尺寸效应超过了结合水膜厚度效应造成的。

而对于55 kPa围压下的柔性壁渗透试验,试样在制样过程产生的不均匀现象仍存在,土样中除了粒内孔隙和粒间孔隙外,还可能更大尺寸的孔隙或裂隙。这种孔隙或裂隙在实际施工中是常常会遇到的,并往往在渗透过程中起主导作用。由于大孔隙或裂隙的存在,粒间孔隙尺寸效应不显著,从而导致渗透系数实测值大于估算值、固有渗透率随温度的升高而增大(图4(a)和图5(a))。

4 结论

a. 当温度一定时,柔性壁渗透试验中,由于围压的作用导致孔隙水排出,土样被压密,渗透系数随时间逐渐减小并趋于稳定;硬性壁渗透试验中土样干密度保持不变,所得渗透系数没有表现出随时间逐渐减小的趋势。

b. 对于本文所采用的黏土,柔性壁和硬性壁渗透试验所得的渗透系数均随温度的升高而增大,从20℃到70℃,两种试验方法所得结果的最大增幅分别为5.5倍和2.7倍。渗透系数的对数值与温度线性正相关。由于两种渗透试验中试样尺寸和制样方法等方面的差异,柔性壁渗透试验所得渗透系数大于相应干密度下硬性壁渗透试验结果。

c. 仅考虑流体的黏滞系数和密度随温度的变化(即SL237—1999《土工试验规程》中规定的方法——假设固有渗透率为定值)时,估算的渗透系数随温度的变化规律与实测结果一致,表明渗透系数随温度的变化主要是由流体物理性质的变化引起的。但渗透系数估算值与实测值有一定差异,尤其是柔性壁渗透试验55 kPa围压下估算值显著小于实测值。

d. 柔性壁渗透试验55 kPa围压下所得固有渗透率随温度的升高而显著增大,硬性壁渗透试验所得固有渗透率随温度升高而略有减小。由于结合水量和水膜厚度随温度的升高而减小,且孔隙分布的不均匀性及粒间孔隙尺寸随温度发生变化,导致固有渗透率随温度表现出增大或减小的趋势。

参考文献:

[1] BOUAZZA A, NAHLAWI H, ALYWARD M. In-situ temperature monitoring in an organic waste landfill cell [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(12): 1286-1289.

[2] JAFARI N H, STARK T D, ROWE R K. Service life of HDPE geomembranes subjected to elevated temperatures [J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2014, 18(1): 16-26.

[3] ABUEL-NAGA H M, BOUAZZA A, GATES W. Impact of bentonite form on the thermal evolution of the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners [J]. *Geotechnique*, 2013, 3(2): 26-30.

[4] BARCLAY A, RAYHANI M T. Effect of temperature on hydration of geosynthetic clay liners in landfills [J]. *Waste Management and Research*, 2013, 31(3): 265-272.

[5] CHO W J, LEE J O, CHUN K S. The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 1999, 14: 47-58.

[6] SOUTHEN J M, ROWE R K. Modeling of thermally induced desiccation of geosynthetic clay liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, 23: 425-442.

[7] 邵玉娟, 施斌, 刘春, 等. 黏性土水理性质温度效应研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(10): 1576-1582. (SHAO Yuxian, SHI Bin, LIU Chun, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1576-1582. (in Chinese))

[8] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on

the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ01 bentonite [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68: 281-288.

[9] 白冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响 [J]. *岩土力学*, 2003, 24(4): 533-537. (BAI Bin, ZHAO Chenggang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 533-537. (in Chinese))

[10] BEAR J. *Dynamics of fluids in porous media* [M]. New York: American Elsevier, 1972.

[11] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, RAMANA G V, et al. Experimental evaluation of engineering behaviour of soft Bangkok clay under elevated temperature [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(7): 902-910.

[12] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(4): 343-354.

[13] MORIN R, SILVA A J. The effects of high Pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89 (B1): 511-526.

[14] 蔡国庆, 纪小彬. 温度对非饱和土土水特征曲线的影响研究进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(增刊1): 161-165. (CAI Guoqing, JI Xiaobin. Research progress in temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30 (Sup1): 161-165. (in Chinese))

[15] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydromechanical behaviour of a compacted bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1/2/3/4): 337-350.

[16] GEE M L, MCGUIGGAN P M, ISRELECHVILI J. Liquids to solid like transition of molecularly thin films under shear [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1990, 93: 1895-1906.

[17] 叶为民, 申淼, 王琼. 温控高压实膨润土-砂混合物微观结构特征 [J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(3): 321-324. (YE Weimin, SHEN Miao, WANG Qiong. Micro-structural characteristic of highly compacted san-bentonite mixtures at different temperatures [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2013, 31(3): 321-324. (in Chinese))

[18] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran [J]. *Canada Geotechnical Journal*, 2007, 44: 276-283.

[19] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils [J]. *Engineering Geology*, 2008, 97: 25-31.

[20] OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 89: 91-103.

(收稿日期: 2016-06-05 编辑: 熊水斌)