

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.11

膨润土防水毯渗透性能的温度效应

何俊, 颜兴, 王小琦, 万娟

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:以颗粒状钠基膨润土防水毯为研究对象,采用改造的GDS全自动环境岩土渗透仪开展渗透试验,研究温度和压力对渗透系数的影响。研究表明:低围压下膨润土防水毯的渗透系数随温度的增加而减小,温度较高时趋于平缓或略有增大;围压增为100 kPa时,渗透系数随温度的增加而增大。固有渗透率随温度的增加而减小;低围压下固有渗透率减小更显著,仅考虑流体物理性质变化的渗透系数估算值与实测值有很大差异。膨润土吸附结合水量随温度的升高而减小,不能解释膨润土防水毯渗透系数和固有渗透率随温度的变化规律。当温度升高时,粒间孔隙减小且颗粒状膨润土分解成凝胶态蒙脱石颗粒,在低围压下凝胶态蒙脱石颗粒层间距离减小,是渗透系数和固有渗透率随温度的升高而减小的主要原因。

关键词:颗粒状膨润土;膨润土防水毯;渗透性;温度效应;结合水;凝胶态蒙脱石颗粒

中图分类号: TU411.4; TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0075-08

Temperature effects of geosynthetic clay liner on hydraulic conductivity

HE Jun, YAN Xing, WANG Xiaoqi, WAN Juan

(College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: The hydraulic tests were conducted on geosynthetic clay liners (GCL) containing granular Na-bentonite under different temperatures and pressures, using the GDS geoenvironmental permeameter. Under low pressures, the hydraulic conductivity decreases with the temperature, and will be gentle or slightly increases when the temperature is over 50-60 °C. Nevertheless, the hydraulic conductivity decreases with the temperature under the pressure of 100 kPa. The intrinsic permeability decreases with the temperature, which is more significantly under low pressures. Therefore, a great difference exists between the estimated and the measured hydraulic conductivities when only considering the change in physical properties of the fluid with temperature. The adsorbed water content of bentonite decreases with the temperature, resulting in the estimated hydraulic conductivity less than the measured value and intrinsic permeability increasing with temperature, which cannot explain the permeability of GCL. With the increasing temperature, the granular bentonite will transform into the montmorillonite gel. Under low pressure, the distance between montmorillonite in intraparticle pore decreases with temperature, resulting in the decrease in hydraulic conductivity and intrinsic permeability.

Keywords: granular bentonite; geosynthetic clay liner; hydraulic conductivity; temperature effects; adsorbed water; montmorillonite gel

膨润土防水毯(Geosynthetic Clay Liner, GCL)由于其较低的渗透系数和较好的自愈合能力,且安装方便、

收稿日期: 2017-06-14; 修订日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51608182; 51409097); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目资助(T201605)

第一作者: 何俊(1977-), 女, 教授, 主要从事环境岩土工程教学与研究工作。E-mail: hjunas@163.com

造价较低,在环境岩土工程中的应用日益广泛,常被用作垃圾填埋场等环保设施的底部衬垫和最终覆盖层,用于代替压实黏土衬垫。由于垃圾中有机物降解产生的热能,引起填埋场场内衬垫系统的温度可达 40 ~ 60 ℃,持续时间可超过 10 年^[1]。近年来,越来越多的学者关注膨润土防水毯的温度效应问题,主要涉及以下几个方面:现场温度的变化引起 GCL 冻融和干燥问题^[2];流体的物理性质、膨润土的结构、渗透系数及扩散系数等与温度的关系,及其对流体运移的影响^[3~4];衬垫中温度梯度引起的流体运移,即热扩散现象^[5];GCL 的力学性质及其中土工材料的耐久性与温度的关系等^[6]。其中渗透系数的温度效应是影响衬垫系统有效性的首要因素,但目前仍以一般黏土的研究为主^[7~8],针对 GCL 的研究仍有限^[3]。

温度对渗透性的影响主要由动力粘滞系数的变化产生,可以表示为^[9]:

$$k_T = K_T \frac{g}{\eta_T} \quad (1)$$

式中: k ——渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

K ——固有渗透率/ m^2 ;

η ——运动粘滞系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), $\eta = \mu/\rho$ (μ 为动力粘滞系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$), ρ 为密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$));

g ——重力加速度/ 9.81 m/s^2 ;

下标 T 为试验温度。

动力粘滞系数随温度升高而减小,导致渗透系数增大。当假定 K 不随温度变化时, k 仅与 η 有关,据此可进行渗透系数的温度修正。我国规范中将 20 ℃ 作为标准温度,即要将渗透试验结果修正为标准温度下的值^[10]:

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

然而,温度对渗透性的影响不单单与孔隙水的动力粘滞系数有关,还可能与土的矿物成分、微观结构、孔隙溶液中离子浓度和种类等因素有关。Bouazza 等对粉末状钠基膨润土防水毯的研究发现,渗透系数随温度的升高而增大,其主要原因在于流体粘滞性随温度发生变化,以及粒间和粒内孔隙的重分布^[3]。Ishimori 等研究了 NaCl 溶液作用下粉末状钠基膨润土防水毯的渗透性能,发现当温度从 20 ℃ 升高至 60 ℃ 时,渗透系数增大约 1 个数量级,固有渗透率增大约 4

倍^[11]。Abuel-Naga 等研究了 50 ~ 150 kPa 上覆压力作用下、20 ~ 60 ℃ 时粉末状和颗粒状钠基膨润土防水毯的渗透性能,并对其机理进行了初步分析,发现粉末状膨润土水化后孔隙结构较均匀,渗透系数随温度的升高而增大,其主要原因在于结合水膜厚度和流体物理性质发生变化;而颗粒状膨润土水化后具有双重孔隙结构,渗透系数随温度变化规律与粉末状钠基膨润土防水毯不同,除了结合水膜厚度和流体物理性质外,孔隙分布特征随温度而变化是导致这种现象的主要原因^[4]。我国生产和使用的 GCL 以颗粒状钠基膨润土为主,不同水化压力和围压作用下其渗透性质的温度效应及其机理还有待于深入研究。此外,以上研究均采用硬性壁渗透试验方法,可能存在侧壁渗漏问题^[12]。

本文选用填埋场常用的颗粒状钠基膨润土防水毯为研究对象,采用改造的 GDS 全自动环境岩土渗透仪,开展不同水化压力、围压和温度条件下 GCL 渗透试验,研究 GCL 渗透性能随温度的变化规律及其机理,以期更符合填埋场实际工况的 GCL 设计与评价提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验选用上海盈帆工程材料有限公司生产的膨润土防水毯(图 1),该产品采用针刺法将钠基膨润土颗粒固定于有纺土工布和无纺土工布之间形成,其单位面积质量大于 4.8 kg/m^2 ,膨润土中蒙脱石质量 85% ~ 90%。膨润土比重约 2.83,液限和塑限分别为 232.0% 和 43.0%,BET 比表面积为 66.364 7 m^2/g 。



图 1 试验所用膨润土防水毯及颗粒状膨润土

Fig.1 Geosynthetic clay liner and granular bentonite for test

1.2 试验方案

采用 GDS 全自动环境岩土渗透仪进行渗透试验。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。试验装置见图 2。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。试验用水选用去离子水。



图 2 控制温度的渗透试验装置

Fig.2 Permeameter apparatus with temperature control

参考我国现行规范^[10]及文献[3]等,试验步骤及方案为:

(1)土样裁剪。将直径为 70 mm 的环刀放在 GCL 试样中心,沿环刀外沿画出切割线,用注射器沿切割线均匀注入适量去离子水,水化 2~5 min 后裁剪。

(2)装样及压力室注水。试样上下放置滤纸和透水石,其中透水石用去离子水浸泡 24 h 后烘干。试样装好后,向压力室中注满水。

(3)反压饱和。水化饱和时围压(即水化压力)设定为 35 kPa,上下游压力均为 15 kPa,反压饱和 48 h。

(4)渗透试验。围压设定为 40 kPa,上游压力增至 30 kPa,下游保持 15 kPa 不变,进行室温下渗透试验(根据水化压力和渗透试验时的围压值,记为 35~40)。

(5)控制温度分别设定为 20,35,50 和 70 ℃,升温过程中压力室、上下游均与大气连通。当温度达到设定温度后进行渗透试验。每个温度下渗透试验完成后,立即拆样测量尺寸。

(6)另取试样,设定不同的水化压力和渗透试验时的围压进行试验,试样编号及具体压力见表 1。

表 1 试验结果汇总

Table 1 Summary of test results

试样编号	水化压力/ kPa	渗透试验 围压/kPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)				
			20 ℃	35 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃
35-40	35	40	1.23×10 ⁻⁷	5.3×10 ⁻⁸	2.92×10 ⁻⁸	—	3.45×10 ⁻⁸
35-50	35	50	3.92×10 ⁻⁸	2.6×10 ⁻⁸	1.95×10 ⁻⁸	1.37×10 ⁻⁸	1.82×10 ⁻⁸
35-100	35	100	8.88×10 ⁻⁹	9.9×10 ⁻⁹	1.44×10 ⁻⁸	—	1.75×10 ⁻⁸
45-50	45	50	2.58×10 ⁻⁸	1.8×10 ⁻⁸	1.4×10 ⁻⁸	1.5×10 ⁻⁸	1.66×10 ⁻⁸

以上试验均取 2~3 个 GCL 试样进行平行试验。渗透试验的结束标准参考规范^[10]中的有关规定,即上下游流量比率在 0.75~1.25 之间、最后连续测得的流量值在平均流量值的 0.75~1.25 倍之间。

2 试验结果及分析

2.1 试样尺寸随温度的变化

水化前后及各温度下渗透试验完成后试样尺寸的代表性结果见图 3。可以看出,水化后试样直径和厚度均增大;水化 48 h 后到 20 ℃渗透试验结束时,由于膨润土吸水水化饱和仍在进行,试样直径和厚度继续增大;随后各温度下渗透试验完成后,试样尺寸基本不变化(试样厚度 35 ℃渗透试验结束后基本不变)。因

此可以认为,在本文试验条件下渗透试验时试样尺寸随温度的变化较小。这与文献[3]的试验结果规律一致。因此,渗透系数采用试样的最终尺寸来计算。

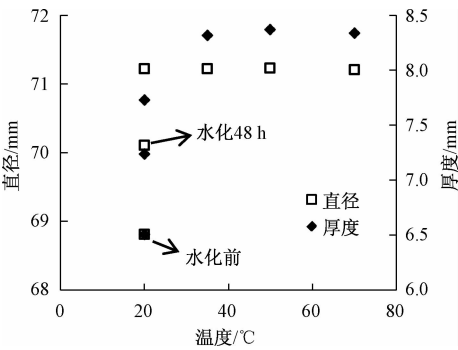


图 3 试样尺寸的变化(45~50)

Fig.3 Variation in sample size (45-50)

2.2 渗透系数与时间的关系

根据上游压力源和下游压力源中水量的变化,由达西定律可分别计算出上游和下游渗透系数,代表性试验结果见图 4。可以看出,上游及下游渗透系数均随试验时间的增加而减小,试验初期上、下游渗透系数差别较大且随时间减小较快,后期上、下游渗透系数接近且趋于稳定。其主要原因在于 GCL 在围压作用下固结,试样趋于密实。试验发现,当时间超过 15 h 后能达到渗透试验结束标准,为统一起见,以下均取 15 h 时上游与下游的平均渗透系数进行分析。

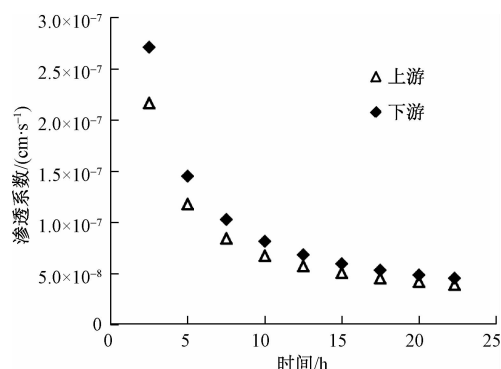


图 4 上下游渗透系数随时间的变化 (35-40, 50 °C)

Fig. 4 Hydraulic conductivity for upstream and downstream with time (35-40, 50 °C)

2.3 渗透系数的平行试验结果

水化压力和渗透试验围压分别为 35 kPa 和 40 kPa 时平行试验结果见图 5。可以发现,平行试验的结果有一定的变异性,变异系数在 0.11 ~ 0.72 之间;但渗透系数随温度的变化趋势是一致的。在此压力条件下,渗透系数随着温度的升高而降低,温度较低时渗透系数下降速度快,温度较高时渗透系数变化趋于平缓或略有升高趋势。平行样试验结果平均值见表 1。

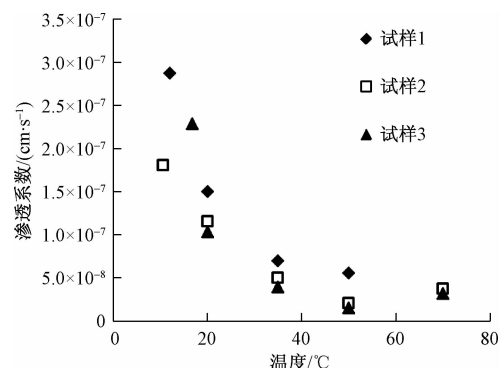


图 5 渗透系数的平行试验结果 (35-40)

Fig. 5 Hydraulic conductivity for the parallel test (35-40)

2.4 渗透系数与温度及围压的关系

水化压力为 35 kPa、各渗透试验围压下渗透系数与温度的关系曲线见图 6。

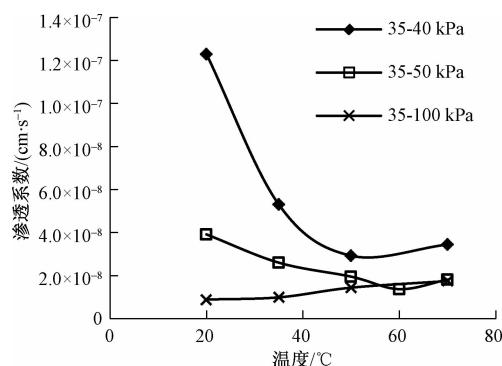


图 6 不同围压下渗透系数与温度的关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity and temperature under different confining pressures

由图 6 可以看出:

(1) 当水化压力相同时,不同渗透试验围压下渗透系数与温度之间表现出不同的变化规律。100 kPa 围压下渗透系数随温度升高而增大;其他两种围压下渗透系数与温度的变化趋势相同,即温度较低时渗透系数随温度的升高而降低,温度达 60 °C 左右时渗透系数趋于平缓或略有升高。

(2) 当水化压力相同时,渗透试验围压越小,渗透系数越大,随温度的变化越明显。40 kPa 围压下,渗透系数从 20 °C 时的最大值 (1.2×10^{-7} cm/s) 减小到 50 °C 时的最小值 (2.9×10^{-8} cm/s),前者为后者的 4.2 倍;50 kPa 围压下渗透系数低于 40 kPa 围压,随温度的变化较平缓,渗透系数从 20 °C 时的最大值 (3.9×10^{-8} cm/s) 减小到 60 °C 时的最小值 (1.4×10^{-8} cm/s),前者为后者的 2.8 倍。

(3) 100 kPa 围压下渗透系数最小,从 20 °C 时 8.9×10^{-9} cm/s 增大到 70 °C 时 1.8×10^{-8} cm/s,前者为后者的 0.51 倍。

文献[4]采用硬性壁渗透仪对颗粒状膨润土防水毯的研究发现,当上覆压力为 100 kPa 和 150 kPa 时,渗透系数随温度的增加而增大,本文 100 kPa 围压下的试验结果与此一致;当上覆压力为 50 kPa 时,渗透系数随温度的增大而减小,但 30 °C 附近存在一个界限孔隙比,此时温度对渗透系数几乎没有影响。本文在低围压下也发现类似的现象,但由于试验材料、试验条件等不同,本文发现在 60 °C 附近渗透系数随温度的变化较小。

2.5 渗透系数与温度及水化压力的关系

水化压力不同、渗透试验围压为 50 kPa 时渗透系数与温度的关系曲线见图 7。

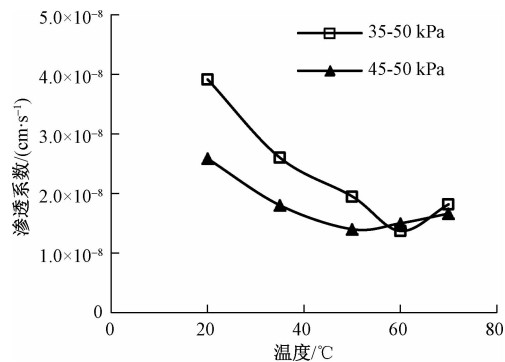


图 7 不同水化压力下渗透系数与温度的关系

Fig.7 Relationship between hydraulic conductivity and temperature under different hydration pressures

可以看出,渗透系数随温度的变化规律相同,即随温度的升高先减小后略有增大。与水化压力为 35 kPa 时试验结果相比,水化压力为 45 kPa 时渗透系数略小。20 ~ 50 °C 时,45 kPa 水化压力下渗透系数为 35 kPa 下渗透系数的 0.7 倍左右,60 和 70 °C 时两种水化压力下渗透系数相差不多。

3 讨论

3.1 渗透系数估算及固有渗透率

渗透系数随温度的变化首先要考虑流体物理性质的影响,如粘滞系数和密度等。当按照规范^[9]中给定的温度修正方法,即仅考虑粘滞系数和密度随温度的变化(表 2)、假设固有渗透率为常数时,可用 20 °C 时的渗透系数估算其他温度下的渗透系数 ($k_T = k_{20} \eta_{20} / \eta_T$), 所得的结果见图 8。

表 2 试验温度下水的性质参数^[3]及固有渗透率计算值

Table 2 Some properties of water and intrinsic permeability at the test temperatures

温度/°C	动力粘滞系数/ ($\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	固有渗透率/ m^2			
			35 ~ 40 kPa	35 ~ 50 kPa	35 ~ 100 kPa	45 ~ 50 kPa
20	1.002	998.2	1.26×10^{-16}	4.01×10^{-17}	9.09×10^{-18}	2.65×10^{-17}
35	0.725	993.9	3.95×10^{-17}	1.94×10^{-17}	7.37×10^{-18}	1.34×10^{-17}
50	0.547	988.0	1.65×10^{-17}	1.1×10^{-17}	8.14×10^{-18}	7.92×10^{-18}
60	0.467	983.2	—	6.64×10^{-18}	—	7.27×10^{-18}
70	0.404	977.8	1.45×10^{-17}	7.67×10^{-18}	7.38×10^{-18}	7.01×10^{-18}

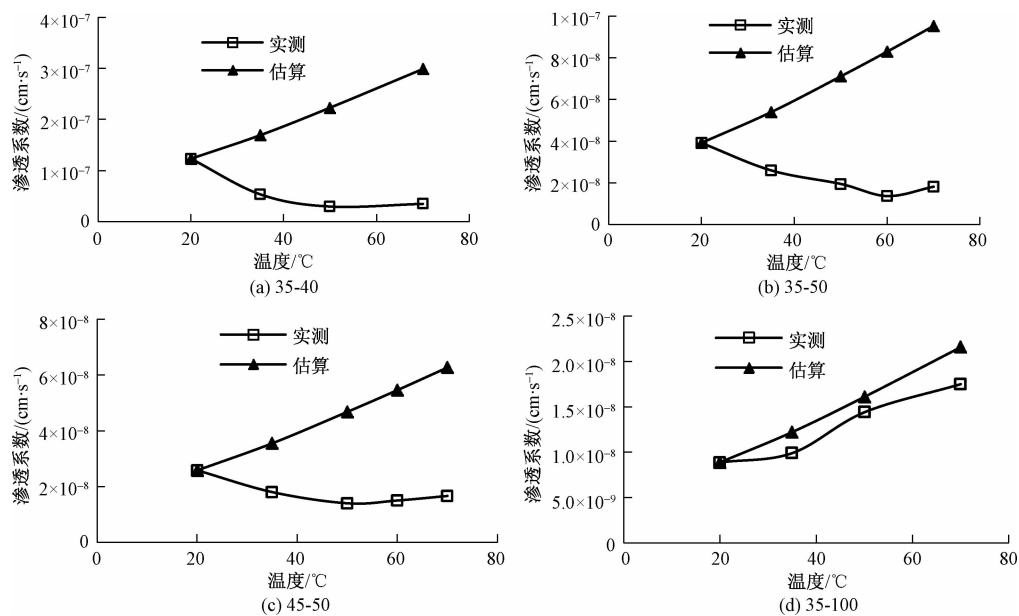


图 8 渗透系数估算值与实测值的比较

Fig.8 Comparison between estimated and measured hydraulic conductivities

可以看出,100 kPa 围压下估算渗透系数与实测结果随温度变化的规律是一致的,即渗透系数随温度的升高而增大,但估算值略大于实测值;而其他压力条件下估算值显著大于实测值,且与实测值随温度变化的规律是相反的。这表明,100 kPa 围压下 GCL 渗透系数随温度的变化可以用流体物理性质的变化来解释,而其他压力下则需要用其他机理来分析,按照规范中渗透系数温度修正得到的结果是不正确的。

实际上,根据式(1)反算出的固有渗透率并不是一个定值(表 2),其与温度的关系见图 9。总体来看,固有渗透率随温度的增加而减小。其中,水化压力 35 kPa、渗透试验围压 100 kPa 下固有渗透率随温度的变化较平缓,略有减小的趋势;其他三种压力下固有渗透率变化较大,尤其在低于 50 °C 时随温度增加而显著减小。文献[11]也发现 GCL 固有渗透率在不同温度下不是定值,但随着温度升高而增大。本文与文献[11]的差异在于后者 GCL 中膨润土为粉末状,且试验用水为 NaCl 溶液。

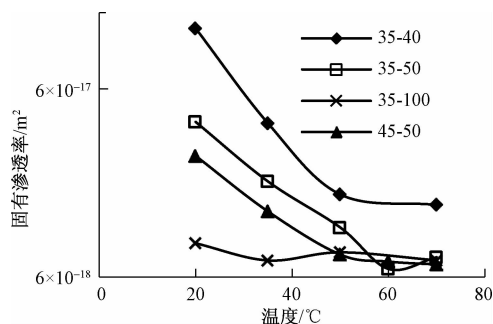


图 9 固有渗透率与温度的关系

Fig. 9 Relationship between the intrinsic permeability and temperature

3.2 吸附结合水

随着温度的增加,除了流体的物理力学性质发生变化以外,土颗粒与流体之间的物理化学作用形成的扩散双电层也可能发生变化。采用吴凤彩提出的容量法^[7,13],取 GCL 中的膨润土颗粒进行试验,将干燥膨润土装入盛有定量水的容量瓶,放入设定温度的水浴中,根据容量瓶液面的变化计算吸附结合水量 w ,即:

$$w = \frac{\rho_e \rho_T \Delta V}{\rho_e - \rho_T m_s} \quad (3)$$

式中: ρ_e ——吸附结合水的平均密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),取 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ^[7];

ρ_T ——温度 T 时自由水的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),按表 2 取值;

ΔV ——自由水转化为结合水时水体积的变化量;

m_s ——干燥膨润土质量。

吸附结合水试验结果见图 10。可以看出,吸附结合水量随温度的增加显著减小,由 20 °C 时的 50.6% 减小至 70 °C 时的 41.8%。如前所述,温度对试样尺寸的影响不大,则试样孔隙比基本不变;当吸附结合水量减小时,扩散结合水和自由水量必然增大,则渗透过程中水的流动通道变大,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增加而增大。这与上述试验结果是相反的。因此,吸附结合水量随温度的变化也不能解释膨润土防水毯渗透性能随温度的变化规律。

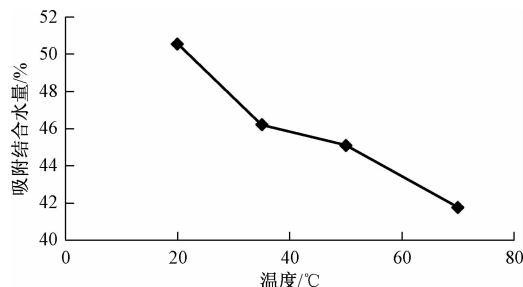


图 10 吸附结合水量与温度的关系

Fig. 10 Relationship between the adsorbed water content and temperature

3.3 孔隙特征随温度的变化

膨润土中存在多个层次的颗粒和孔隙,其中孔隙可以分为粒内孔隙和粒间孔隙两类,前者为存在于颗粒集聚体内部的孔隙,后者则是颗粒集聚体之间的孔隙。粒间孔隙中不完全由水填充,而是由凝胶态蒙脱石所占据^[14]。假设干燥膨润土中有 f 部分蒙脱石水化后形成水化膨润土颗粒,其余的 $(1-f)$ 部分蒙脱石水化后属于凝胶态,笔者曾推导出凝胶态蒙脱石矿物层间距距离的一半 d_2 的表达式为^[15]:

$$d_2 = \frac{\left(\frac{e(R_{\text{ion}} + t)}{C_m} + R_{\text{ion}} - fd_1 \right)}{(1-f)} \quad (4)$$

式中: e ——膨润土孔隙比;

R_{ion} ——吸附性阳离子半径;

t ——蒙脱石矿物层的厚度;

C_m ——膨润土中蒙脱石含量;

d_1 ——水化固体颗粒层间距离的一半。

将式(4)对 f 求导数,有:

$$d'_2 = \frac{\left(\frac{e(R_{\text{ion}} + t)}{C_m} + R_{\text{ion}} - d_1 \right)}{(1-f)^2} \quad (5)$$

由上式可知:当 $e > e_1 = \frac{(d_1 - R_{\text{ion}})C_m}{(R_{\text{ion}} + t)}$ 时, $d'_2 > 0$;

当 $e \leq e_1$ 时, $d'_2 \leq 0$,此时 d_2 不随 f 的变化而变化或与 f 成反比。

已有研究表明,当温度发生变化时,膨润土的孔隙特征将随之变化。当温度升高时,黏土结合水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^[16]。叶为民等对高压实膨润土-砂混合物微观结构的研究也发现,当温度为20℃时,土样孔径分布为双峰结构,即存在大孔隙和小孔隙;当温度为60℃时,土样大孔隙消失,只存在小孔隙^[17]。同时,当温度升高时,原有颗粒状膨润土发生分解,粒间孔隙中凝胶态蒙脱石增多^[4](即 f 减小)。而粒间孔隙中凝胶态蒙脱石矿物层间距离是控制膨润土防水毯渗透性的关键之所在。

当围压较小而温度升高时,试样体积随温度的变化不大,但粒间孔隙变小、凝胶数量增加(即 f 减小)。由于围压较小、 e 较大,当 $e > e_1$ 时可能导致 $d'_2 > 0$, d_2 将随 f 的减小而减小。而由Poiseuille定律知渗透系数与层间距离的平方成正比,这种效应导致渗透系数和固有渗透率随温度的升高呈降低趋势。而当围压较大、 e 较小时,则相反。

当温度升高时,吸附结合水量的减小使固有渗透率增大,而孔隙特征及凝胶态蒙脱石数量的变化使固有渗透率减小(e 较大时)或增大(e 较小时)。在两种效应的共同作用下,固有渗透率随温度而变化。

4 结论

(1)当水化压力相同时,在渗透试验围压较低(40和50 kPa)情况下,颗粒状钠基膨润土防水毯的渗透系数随温度的增加而显著减小,温度达60℃左右后渗透系数的变化趋于平缓或略有增大;而渗透试验围压较高(100 kPa)情况下,渗透系数随温度的增加而增大。当水化压力从35 kPa增大到45 kPa而渗透试验围压相同时,渗透系数略有降低,两种水化压力下渗透系数随温度的变化规律相同。

(2)在本文试验压力下,膨润土防水毯的固有渗

透率均随温度的增加而减小。低围压下固有渗透率随温度的变化更显著,假定固有渗透率为定值即仅考虑流体物理性质变化的渗透系数估算值远大于实测值,按照规范中温度修正方法得到的渗透系数是不正确的。

(3)当温度从20℃增大至70℃时,膨润土吸附结合水量随温度的升高而显著减小(由20℃时的50.6%减小至70℃时的41.8%),导致渗透过程中水的流动通道变大,从而使渗透系数估算值小于实测值、固有渗透率随温度的增加而增大。吸附结合水的变化不能解释膨润土防水毯渗透系数和固有渗透率随温度的变化规律。

(4)当温度升高时,粒间孔隙减小,且颗粒状膨润土发生分解形成更多的凝胶态蒙脱石颗粒。当围压较小时,凝胶态蒙脱石颗粒层间距离随温度的升高而减小,导致渗透系数和固有渗透率均随温度的升高而减小,渗透系数估算值大于实测值,是低围压下颗粒状膨润土防水毯渗透系数随温度变化的主要原因。

参考文献:

- [1] ROWE R K. Long-term performance of contaminant barrier systems [J]. *Geotechnique*, 2005, 55(9): 631-678.
- [2] ROWE R K, BOSTWICK L E, TAKE W A. Effect of GCL properties on shrinkage when subjected to wet-dry cycles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(11): 1019-1027.
- [3] BOUAZZA A, ABUEL-NAGA H M, GATES W P, *et al.* Temperature effects on volume change and hydraulic properties of geosynthetic clay liners [C]// *Proc. 1st Pan American Geosynthetics Conf.*, Cancun, Mexico (CD-Rom), 2008.
- [4] 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: 26-30.
- [5] XIE H, ZHANG C, SEDIGHI M, *et al.* An analytical model for diffusion of chemicals under thermal effects in semi-infinite porous media [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 69: 329-337.
- [6] AZAD F M, ROWE R K, EL-ZEIN A, *et al.*

- Laboratory investigation of thermally induced desiccation of GCLs in double composite liner systems [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29: 534 – 543.
- [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 Y X, SHI B, LIU C, *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] 何俊,阮晓晨,胡晓瑾,等. 温度和模拟渗滤液作用下黏土的渗透性能研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44 (1): 116 – 122. [HE J, RUAN X C, HU X J, *et al.* Effects of Temperature and Analog Leachate on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44 (1): 116 – 122. (in Chinese)]
- [9] BEAT J. Dynamics of fluids in porous media [M]. American Elsevier, New York. 1972.
- [10] 中华人民共和国建设部. JG/T 193—2006 钠基膨润土防水毯 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [P. R. C. Ministry of Construction. JG/T 193—2006 Sodium Bentonite Geosynthetic Clay Liner [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [11] ISHIMORI H, KATSUMI T. Temperature effects on the swelling capacity and barrier performance of geosynthetic clay liners permeated with sodium chloride solutions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 33: 25 – 33.
- [12] CLEARY B A, LAKE C B. Comparing measured hydraulic conductivities of a geotextile polymer coated GCL utilizing three different permeameter types [C]// *Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, ASCE, 2011.
- [13] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点 [J]. *岩土工程学报*, 1984, 6 (6): 84 – 93. [WU F C. The Adsorbed Bound Water Content Measurement and Some Characteristics of Seepage [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 6 (6): 84 – 93. (in Chinese)]
- [14] YONG R N. Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54: 83 – 91.
- [15] 何俊,施建勇. 膨润土中饱和和渗透系数的计算 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26 (增刊 2): 3920 – 3925. [HE J, SHI J Y. Calculation of Saturated Permeability Coefficient of Bentonite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (Sup 2): 3920 – 3925. (in Chinese)]
- [16] GEE M L, McGuigan P M, Israelechvili 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,申森,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 W M, SHEN M, WANG Q. 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)]

责任编辑:张明霞