

带缺陷膨润土防水毯的渗透试验

何 俊 ,肖衡林 ,孔祥怡

(湖北工业大学土木工程与建筑学院 ,湖北 武汉 430068)

摘要 :分别以自来水和 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液作为渗滤溶液研究带缺陷膨润土防水毯(GCL)的渗透性能。试验结果表明 :自来水渗滤时 ,GCL 的渗透系数随着缺陷直径的增大而增大 ,缺陷直径达 11 mm 时缺陷不能完全愈合 ,致使渗透系数超过 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。 CaCl_2 溶液渗滤时 ,随着离子交换作用的进行 ,渗透系数随孔隙体流量的增大有增大的趋势 ,缺陷直径小于 5 mm 时 GCL 具有一定的自愈能力 ,但增至 7mm 时缺陷不能愈合 ,溶液和缺陷的共同作用使得 GCL 的防渗性能很差。

关键词 :膨润土防水毯 ;防渗性能 ;自愈能力 ;渗透系数 ;孔隙体流量

中图分类号 :TV131.2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)06-0016-03

Hydraulic conductivity tests on damaged geosynthetic clay liners//HE Jun ,XIAO Heng-lin ,KONG Xiang-yi(College of Civil and Architectural Engineering , Hubei University of Technology , Wuhan 430068 , China)

Abstract : The permeability of damaged geosynthetic clay liner (GCL) was studied by using the tap water and the 0.05 mol/L CaCl_2 solution as the percolating liquid , respectively . The results show that for the taper water , the hydraulic conductivity of the damaged GCL increases with the increase of hole diameter . The damaged GCL can not self-heal when the hole diameter reaches 11 mm , and the hydraulic conductivity will be larger than $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. For the 0.05 mol/L CaCl_2 solution , the hydraulic conductivity of the damaged GCL increases with the increase of pore volume flows due to ion exchange . The damaged GCL have certain self-healing capacity when the hole diameter is less than 5 mm and can not self-heal when the hole diameter reaches 7 mm . The combined action of the solution and the defect results in poor permeability performance of the damaged GCL .

Key words : geosynthetic clay liner ; permeability ; self-healing capacity ; hydraulic conductivity ; pore volume flow

膨润土防水毯(geosynthetic clay liner ,简称 GCL)是由单位面积质量大约为 5 kg/m^2 的膨润土夹在土工织物中间或黏结在土工膜上制成的衬垫材料。由于其厚度小 ,能较好地适应不均匀沉降 ,且具有良好的自愈能力 ,因此在岩土工程和水利工程等领域中应用日益广泛。GCL 的自愈能力是由于其中蒙脱石含量高、交换性阳离子主要为钠离子的膨润土遇水膨胀而产生的。Mazzieri 等^[1]对破损的胶结型 GCL 的渗透试验研究发现 ,在直径为 10 cm 的试样中设置直径为 3 cm 的孔洞渗透系数增大 1 个数量级 ,但离子交换作用的发生将使 GCL 的自愈能力大幅度减弱。Sivakumar 等^[2]采用硬性壁渗透仪对带缺陷的针刺型和缝合型 GCL 进行渗透试验 ,试样直径为 14.5 cm ,设置孔洞直径为 6 ~ 55 mm ,试验发现直径小于 30 mm 的孔洞能够自愈。Egloffstein^[3]指出 ,当上覆土层厚度超过 75 cm 后钙基膨润土具有一定

的自愈能力 ,但不能使较宽的干燥裂缝愈合。李宪^[4]、陈生水等^[5]分别通过柔性壁渗透试验研究发现 ,当直径为 10 cm 的试样中穿孔孔径为 1 cm 和 4.5 mm 时 ,渗透系数超过 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。已有成果虽然指出离子交换作用对 GCL 的自愈能力有影响 ,但仍多以水为对象进行研究。笔者通过试验研究存在圆形缺陷的 GCL 的渗透性能 ,探讨自来水和 CaCl_2 溶液渗滤时 GCL 的自愈能力。

1 试验材料和方法

试验选用的 GCL 由上海盈帆工程材料有限公司生产 ,采用针刺方法将钠基膨润土颗粒固定于 2 层土工布之间 ,单位面积质量大于 4.8 kg/m^2 ,膨润土中蒙脱石的质量分数约为 85% ~ 90%。在 GCL 试样中间开圆孔用于模拟运输和施工等过程中出现的缺陷 ,孔径为 5 ~ 11 mm。由于钙离子和氯离子是

基金项目 :武汉市青年科技晨光计划(200950431166) ;湖北省杰出青年人才项目(2010CDA091) ;湖北省教育厅优秀中青年项目(Q20101408) ;国家自然科学基金(51008120)

垃圾填埋场渗滤液中常见的污染物离子,而渗滤液中高价阳离子的存在是影响 GCL 防渗性能的一个重要因素,且用作封场材料时钙离子与 GCL 膨润土中的钠离子的离子交换是一种较为常见的现象,故分别以自来水和 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液为渗滤溶液研究带缺陷 GCL 的渗透性能。

采用上海土工公路仪器有限公司生产的 STPZS-1 膨润土防水垫渗透仪进行渗透试验。该仪器采用柔性壁试验方法测量渗透系数,能有效防止试验过程中的侧漏,且反压饱和效果较好。根据中国建筑工业行业标准 JG/T 193—2006《钠基膨润土防水毯》^[6]中的规定进行渗透试验,围压设定为 35 kPa,在 15 kPa 的压力下反压饱和 48 h,温度控制在 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。自来水或 CaCl_2 溶液饱和 48 h 后,下游压力保持 15 kPa 不变,增大上游压力至 18 kPa 左右,调节上下游水管水头到适当高度,定时观测上下游压力和水位,计算渗透系数。试验过程中水力梯度在 40~70 之间。

JG/T 193—2006《钠基膨润土防水毯》^[6]中规定,渗透试验终止的标准为最后连续 3 次测试进口流量与出口流量的比在 0.75~1.25 之间,流量没有明显的上升或下降趋势,流量在平均流量值的 0.75~1.25 之间。 CaCl_2 溶液渗滤时,由于离子交换需要时间,随着试验时间的增长渗透系数可能逐渐增大。试验终止的标准包括孔隙体积流量最小为 1~2、出入口浓度达到化学平衡(一般以渗入液和渗出液的 pH 值之比、电导率之比接近 1 来控制)^[7-9]。由于文中 CaCl_2 溶液渗滤时 pH 值和电导率变化相对较小,且选择的溶液浓度较大,故没有以 pH 值之比、电导率之比接近 1 作为终止标准。 CaCl_2 溶液渗滤时孔隙体积流量超过 4。

上下游设定压力和水位后,上游水位下降,下游水位上升。由于上游管中水量有限,为使足够多渗滤液通过试样,需要逐次补充上游水量,称一次上游水位下降的过程为一次渗透。

2 试验结果分析

2.1 自来水渗滤

自来水在完好和带有缺陷的 GCL 中渗滤时,渗透系数 k 随孔隙体积流量 P_{VF} 的变化见图 1。从图 1 可以看出, k 随 P_{VF} 的增大有减小的趋势。 P_{VF} 的计算公式为

$$P_{VF} = \frac{Q}{P_V} \quad (1)$$

$$P_V = (H_{GCL} - H_s)A \quad (2)$$

$$H_s = H_{Bent} + H_{GEO} = \frac{M_{Bent}}{\rho_{Bent}(1 + w_0)} + \frac{M_{GEO}}{\rho_{GEO}} \quad (3)$$

式中: Q 为流过试样的水量,通过上游和下游水位的变化来确定; H_{GCL} 为试样高度; H_s 为 GCL 中固体的高度; A 为试样面积,为试验结束后用卡尺测量确定; H_{Bent} 为膨润土颗粒的高度; H_{GEO} 为土工织物的高度; M_{Bent} 和 M_{GEO} 分别为单位面积上膨润土和土工织物的质量; ρ_{Bent} 和 ρ_{GEO} 分别为膨润土和土工织物的相对密度; w_0 为膨润土风干含水率。

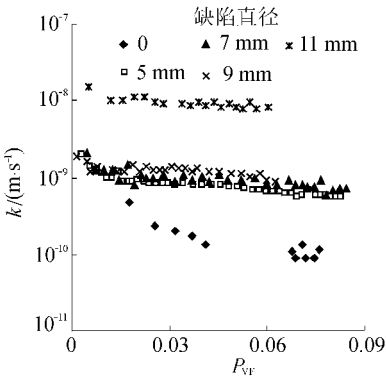


图 1 自来水渗滤时 k 随 P_{VF} 的变化

缺陷直径为 11 mm 时渗透速度 v 与水力梯度 i 的关系见图 2,当两者的关系曲线为直线时,直线的斜率即为渗透系数。但图 2 中两者的关系曲线为上凹型,曲线斜率随水力梯度的增大而增大,即渗透系数随水力梯度的增大有增大的趋势,不能严格服从达西定律。因此,渗透系数随 P_{VF} 的增大略有减小的原因可能是,在试验过程中,随着上游水位的下降和下游水位的上升水力梯度逐渐降低。

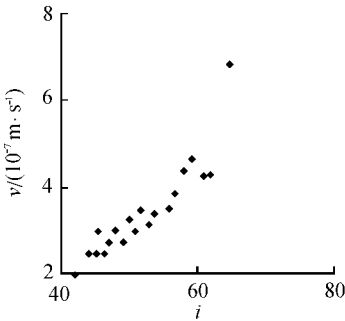


图 2 缺陷直径为 11 mm 时 v 与 i 的关系

渗透系数与缺陷直径的关系如图 3 所示,图中渗透系数为达到稳定标准的平均渗透系数。由图 3 可见,渗透系数随缺陷直径的增大而增大,缺陷直径不超过 9 mm 时,渗透系数小于 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$,符合规范中对衬垫渗透系数的要求;当缺陷直径超过 9 mm 后,渗透系数显著增大,不能满足要求,该结论与文献 4 中结论一致。

2.2 CaCl_2 溶液渗滤

当 GCL 在 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液水化和渗滤

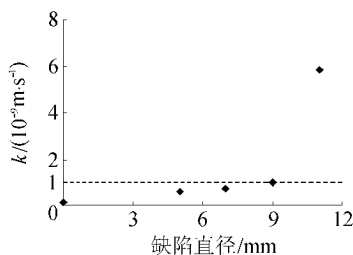


图3 自来水渗滤时 k 与缺陷直径的关系

时,一次渗透过程中 k 随 P_{VF} 的增大有减小的趋势(图4),其规律与自来水渗滤时一致。

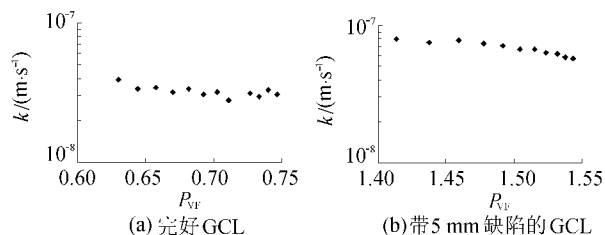


图4 一次渗透过程中 k 随 P_{VF} 的变化

以每次渗透达到稳定时的平均渗透系数为纵坐标,每次渗透结束时的 P_{VF} 值为横坐标,两者之间的关系见图5。由图5可见, k 随 P_{VF} 的增大呈增大的趋势。这个规律与图4不同,主要原因在于控制因素有差异。一次渗滤时,溶液与土的作用时间相对较短,渗透系数的变化可能受试验过程中水力梯度变化的影响较大(如2.1节所述)。图5中渗透系数为每次渗滤达到相对稳定时的平均渗透系数,渗透时间相对较长。完好 GCL 每次渗透稳定时渗透系数与水力梯度的关系见图6。由图6可见,两者之间没有显著的相关性。由此可以认为,多次渗滤时水力梯度的差异不是造成渗透系数变化的主要原因。因此,平均渗透系数随 P_{VF} 的增大应为溶液与膨润土发生相互作用引起的。随着渗滤时间的增长,土与溶液之间发生离子交换作用,溶液对土结构的影响增大,结合水膜厚度减小,可供溶液流动的空

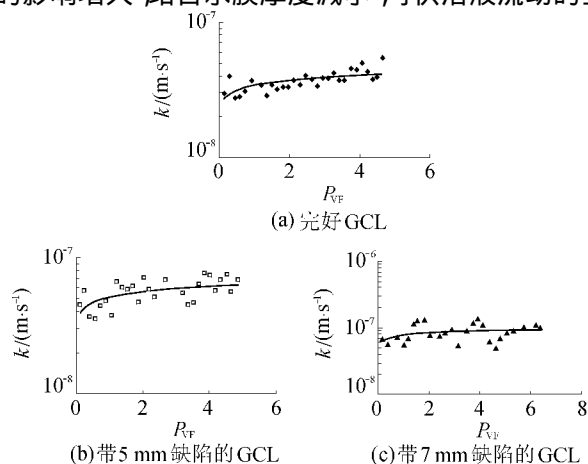


图5 CaCl_2 溶液渗滤稳定时 k 随 P_{VF} 的变化

间相对增大,渗透系数增大。

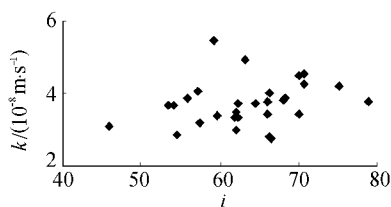


图6 每次渗透稳定时 k 与 i 的关系

分别取 P_{VF} 为 1.5~2.5 和 3.5~4.5 范围内渗透系数的平均值进行比较,发现渗透系数随缺陷直径的增大而增大, CaCl_2 溶液渗滤时完好 GCL 的渗透系数约为 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$,约为自来水渗滤时完好 GCL 渗透系数的 400 倍,比带 11 mm 缺陷的 GCL 的渗透系数还大约 7 倍,表明 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液对 GCL 渗透性的影响比 11 mm 缺陷带来的影响更大。

3 讨论

GCL 的防渗性能、自愈能力与其中膨润土的水化膨胀密切相关。采用固结仪研究 GCL 的膨胀性能,加 6.25 kPa 的压力用以模拟 GCL 铺设后及时上覆保护层的情况,试样压缩稳定后注入水或 CaCl_2 溶液,记录膨胀量直至稳定。其中,变形稳定的标准为 24 h 变形量小于 0.001 mm^[8]。试验结果见图7,由图7可知,自来水和 CaCl_2 溶液水化时 GCL 的膨胀量差别较大,分别为 2.24 mm 和 1.05 mm。相同压力下 GCL 膨胀量越大,吸附的结合水越多,形成的分散凝胶态蒙脱石片越多,水与颗粒之间的相互作用越强,液体越不易通过; CaCl_2 溶液作用下结合水膜薄,溶液渗滤时孔隙较大,而渗流路径远不如自来水渗滤时曲折,因此 CaCl_2 溶液渗滤时比自来水渗滤时渗透系数增大很多。

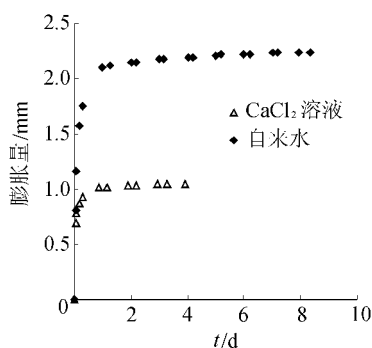


图7 自来水和 CaCl_2 溶液水化时 GCL 膨胀量的比较

在渗透试验中,带缺陷的 GCL 试样水化时缺陷附近的膨润土膨胀使得缺陷逐渐愈合,缺陷直径逐渐减小。当缺陷直径较小时,水化后能够完全愈合,其渗透系数相比完好 GCL 的渗透系数增大不多。例如 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液渗滤,(下转第 26 页)

图3可以看出,轴拉试件随轴力的增大局部滑移长度线性增加,刚度逐渐退化,在轴力较小、构件刚开裂时刚度退化速度快,轴力较大时退化速度减缓,直至钢筋与混凝土完全滑移。

5 结 语

通过上述理论分析及与文献[7]试验结果的对比可以得出:局部滑移理论应用于钢筋混凝土构件的刚度分析和裂缝宽度计算是可行的,但与文献[7]中提供的刚度试验值相比差距较大,尚需进一步结合更多的试验数据进行分析,以得到更为合理的计算公式。轴拉刚度在开裂时退化迅速快,随轴力的增大刚度退化速度逐渐减缓。

参考文献:

[1] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
[2] SL/T191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
[3] 丁大钧.钢筋混凝土构件刚度计算中的若干问题[J].南京工学院学报,1981(2):58-68.
[4] 工民建专业刚度和裂缝科研小组.钢筋混凝土构件刚度和裂缝的计算[J].南京工学院学报,1978(2):29-41.

[5] 杨树标.按变刚度计算钢筋混凝土梁挠度[J].河北煤炭建筑工程学院学报,1992(2):1-8.
[6] 赵博,简斌,王正霖.分段刚度法 混凝土杆系结构一种简化试验分析方法[J].重庆建筑大学学报,2004,26(6):57-62.
[7] 王康平,邓华锋,周济芳,等.钢筋混凝土轴拉构件刚度试验研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2003,25(5):408-412.
[8] 彭守拙,钟建文,谷兆祺,等.考虑隧洞充水过程的衬砌裂缝宽度计算[J].水利水电科技进展,2010,30(5):67-70.
[9] 彭守拙.压力隧洞透水衬砌裂缝宽度计算方法探讨[J].水利水电科技进展,2009,29(3):46-48.
[10] 陈彦玉,黄达海.大型渡槽温控防裂技术及发展趋势[J].水利水电科技进展,2011,31(2):16-21.
[11] 巫昌海,汪基伟,夏颂佑.混凝土三维非正交弥散裂缝模型[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(5):17-20.
[12] 涂木兰.钢筋混凝土黏结的局部滑移理论与参数分析研究[D].南京:河海大学,2009.
[13] 沈蒲生,梁兴文.混凝土结构设计原理[M].北京:高等教育出版社,2002.

(收稿日期:2011-04-21 编辑:骆超)

(上接第18页)带5 mm缺陷的GCL的渗透系数与完好GCL的渗透系数相差不大,表明GCL有一定的自愈能力。渗透试验结束后观察试样发现,自来水和0.05 mol/L的CaCl₂溶液渗滤,缺陷直径较大(分别为11 mm和7 mm)时缺陷不能完全愈合,故渗透系数增大较显著,前者超过 1×10^{-9} m/s,后者达 10^{-7} m/s。GCL在CaCl₂溶液中的水化膨胀量小于在自来水中的膨胀量,因此其在溶液中能够愈合的缺陷直径比在自来水中小。

4 结 论

- a. CaCl₂溶液渗滤时,离子交换需要一定的时间,渗透系数随着 P_{VF} 的增大呈增大趋势。
- b. 自来水渗滤时,GCL中缺陷直径达11 mm时缺陷不能完全愈合,致使渗透系数超过 1×10^{-9} m/s。
- c. 0.05 mol/L的CaCl₂溶液渗滤时,完好GCL的渗透系数比自来水渗滤时增大约400倍,渗透系数随缺陷直径的增大而增大,当直径达7 mm时缺陷不能完全愈合,渗透系数达 1×10^{-7} m/s。溶液和缺陷的共同影响使GCL的防渗性能很差。

参考文献:

[1] MAZZIERI F, PASQUALINI E. Permeability of damaged

geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 2000, 2(2):101-118.
[2] SIVAKUMAR B G L, SPORER H, ZANZINGER H, et al. Self-healing properties of geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 2001, 8(5):461-471.
[3] EGLOFFSTEIN T A. Natural bentonites-influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19:427-444.
[4] 李宪. GCL防渗特性及填埋场防渗系统的研究[D].南京:河海大学,2005.
[5] 陈生水,郑澄锋,杨明昌.新型防渗材料膨润土垫的试验研究[J].水利水运工程学报,2006(3):34-38.
[6] JG/T193—2006 钠基膨润土防水毯[S].
[7] PETROV R J, ROWE R K, QUIGLEY R M. Comparison of laboratory-measured GCL hydraulic conductivity based on three permeameter types[J]. Geotechnical Testing Journal, 1997, 20(1):49-62.
[8] 李志斌,徐超.竖向应力作用下GCL的膨胀特性和渗透性能[J].岩土工程学报,2007,29(12):1876-1880.
[9] LEE J M, SHACKELFORD C D. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1):64-77.

(收稿日期:2011-06-13 编辑:骆超)