

DOI: 10.11779/CJGE201902019

# 水泥固化体淋滤液对 GCL 防渗性能的影响

王 宝<sup>1</sup>, 陈 彬<sup>2</sup>, 窦桐桐<sup>1</sup>, 董兴玲<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 水泥固化/稳定化是危险废弃物处理的经济、高效方法, 然而, 水泥固化体的淋滤液中含有大量  $\text{Ca}^{2+}$ , 其长期渗透有可能导致填埋场底部土工合成黏土衬垫 (geosynthetic clay liner, GCL) 的防渗性能下降, 从而引发二次污染。使用柔性壁渗透仪, 测定有效应力和水泥固化体淋滤液共同作用下 GCL 的渗透系数, 探讨了淋滤液浓度以及不同有效应力对 GCL 渗透系数的影响。试验结果表明: 当有效应力为 24 kPa 时, 水泥固化体淋滤液的持续渗透会使 GCL 的渗透系数增大 179~721 倍, 淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度越高, GCL 渗透系数增大的幅度越大。通过增加有效应力, 可以降低固化体淋滤液对 GCL 防渗性能所造成的负面影响, 当有效应力增大至 438 kPa 时, 固化体淋滤液对 GCL 防渗性能所造成的负面影响全部被抵消。

**关键词:** 固化体; 淋滤液; 土工合成黏土衬垫; 渗透系数; 有效应力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)02-0390-07

**作者简介:** 王 宝(1983-), 男, 讲师, 主要从事固体废弃物填埋处置方面的教学与研究工作。E-mail: wangbao@xauat.edu.cn。

## Influences of stabilization/solidification product leachates on hydraulic performance of geosynthetic clay liners

WANG Bao<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>2</sup>, DOU Tong-tong<sup>1</sup>, DONG Xing-ling<sup>3</sup>

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School

of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Xi'an Research Institute of China Coal

Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Cement solidification/stabilization is an economical and efficient method to dispose hazardous waste. However, the leachates from portland cement stabilization/solidification product landfills generally contain high concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ , which may has detrimental effects on the long-term hydraulic performance of geosynthetic clay liners (GCLs), and cause a secondary pollution. Therefore, hydraulic conductivity tests are performed on the GCLs using two leachates and five effective stresses. The test results show that permeation of leachates results in an increase in the hydraulic conductivity of 179 to 721 times under the effective stress of 24 kPa, and the higher the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  in the leachates, the higher the hydraulic conductivities of the GCLs. The negative effects of the leachates can be offset by the effective stress applied on the GCLs. For example, when the effective stress increases to 438 kPa, the hydraulic conductivities to the leachates are comparable to those obtained for the controlled specimens (permeated with tap water), and the detrimental effects resulting from the permeation of the leachates are balanced completely by the effective stress.

**Key words:** stabilization/solidification product; leachate; geosynthetic clay liner; hydraulic conductivity; effective stress

## 0 引 言

固化/稳定化是危险废弃物处理的常用方法<sup>[1-2]</sup>。

水泥固化体是指以水泥作为固化剂对危险废物 (主要是垃圾焚烧飞灰和电镀污泥等) 进行固化/稳定化后而形成的一种凝结固体。尽管固化/稳定化可以减少污染物的移动性和毒性, 但为了避免可能出现的二次污染, 这些固化体仍然需要送到铺设防渗系统的填埋场中

进行填埋处置。土工合成黏土衬垫 (GCL) 在填埋场防渗系统建设中广泛使用。

GCL 是一种将膨润土夹封在土工织物中间或胶黏在土工膜上而制成的防渗材料<sup>[3-5]</sup>。GCL 具有渗透

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41602291)

收稿日期: 2018-01-08

系数低, 占用体积小, 耐不均沉降, 现场安装简单等诸多优点, 已被广泛用于阻隔各种废弃物的淋滤液, 以防止土壤和地下水受到污染。GCL 极低的渗透系数主要来自于所含的钠基膨润土, 然而, 膨润土自身具有较大的比表面积和表面能, 极易与废弃物淋滤液发生化学反应, 导致防渗性能下降<sup>[6]</sup>。所以, 废弃物淋滤液作用下 GCL 防渗性能的劣化问题一直是环境土工领域研究的热点。作为一种水泥基凝结固体, 水泥固化体在降雨淋溶和地下水浸泡过程中, 极易发生钙溶蚀, 其淋滤液往往含有大量的  $\text{Ca}^{2+}$ , 这种淋滤液长期渗透是否会导致 GCL 防渗性能劣化值得关注。

截至目前, 研究人员已对不同废弃物填埋场淋滤液作用下 GCL 的防渗性能劣化问题进行了研究。例如, Ruhl 等<sup>[7]</sup>、Bradshaw 等<sup>[8]</sup>、Shan 等<sup>[9]</sup>以及 Guyonnet 等<sup>[10]</sup>研究了垃圾淋滤液作用下 GCL 防渗性能劣化情况, 他们使用含有大量  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$  和  $\text{NH}_4^{+}$  的垃圾淋滤液对 GCL 进行渗透试验, 试验结果表明, 垃圾淋滤液不会造成 GCL 渗透系数明显升高, GCL 防渗性能稳定。Lange 等<sup>[11-12]</sup>、Shackelford 等<sup>[13]</sup>、Naka 等<sup>[14]</sup>研究了矿山废弃物淋滤液作用下 GCL 防渗性能劣化情况, 他们使用含有大量重金属 ( $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$ ) 的矿山废弃物淋滤液对 GCL 进行了渗透试验, 发现在矿山废弃物淋滤液的持续作用下, GCL 的渗透系数可以升高 2~4 个数量级, 防渗性能显著下降。Chen 等<sup>[15]</sup>则使用燃煤废弃物淋滤液对 GCL 进行了渗透试验; 在试验中, 其所使用的燃煤废弃物淋滤液主要含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  和  $\text{K}^{+}$ , 试验结果显示, GCL 的渗透系数与淋滤液性质及有效应力大小存在极大关系; 在低有效应力条件下, 燃煤废弃物淋滤液持续渗透导致 GCL 渗透系数升高 1~5 个数量级。

除了各种成分复杂的废弃物淋滤液以外, 研究人员还研究了各种单一组分淋滤液对 GCL 防渗性能的影响。例如, Setz 等<sup>[16]</sup>分析了不同浓度  $\text{NH}_4^{+}$  溶液 (0.005~1000 mol/L) 对 GCL 防渗性能的影响; Liu 等<sup>[17]</sup>使用不同浓度  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液 (0.0125, 0.125, 0.5 mol/L) 对 GCL 进行了渗透, 并分析在其渗透下 GCL 防渗性能的劣化情况; Petrov 等<sup>[18]</sup>则研究了不同浓度的乙醇溶液对 GCL 防渗性能的影响。尽管研究人员已经对多种废弃物淋滤液作用下 GCL 的防渗性能劣化

问题进行了研究, 并取得了丰富成果, 然而, 对于水泥固化体淋滤液作用下 GCL 的防渗性能变化情况, 目前还缺少研究。

本文通过柔性壁渗透仪开展渗透试验, 研究水泥固化体淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  对不同上覆荷载作用下 GCL 防渗性能的影响, 研究结果将为水泥固化体填埋场环境风险评估提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 GCL 的基本性质及测试样品制备

试验所用的 GCL 与 Kang 等<sup>[19]</sup>试验中所使用的 GCL 相同, 其上表面为无纺土工布, 下表面为塑料扁丝编织土工布, 中间所夹封的膨润土为天然钠基膨润土, 使用针刺法制成。膨润土矿物组成为 71% 蒙脱石、15% 石英、7% 混合层伊利石/蒙脱石矿物。膨润土的液限为 478%, 塑限为 30%。

参考 Daniel 等<sup>[20]</sup>的方法进行 GCL 渗透试样制备。在 GCL 的非织造土工布一侧标记出直径为  $101\pm 1\text{ mm}$  的圆。然后使用刻刀沿着圆周将非织造土工布割开, 为防止膨润土散落, 用移液枪向割开的缝隙中注入少量蒸馏水, 促使膨润土水化黏结。随后, 用刻刀将塑料扁丝编织土工布割断, 将圆形试样取出, 测量厚度并称重。因为裁剪时使用蒸馏水湿化膨润土, 有近 1/2 的蒸馏水被 GCL 试样中的膨润土所吸收, 所以 GCL 的真实质量需要减去 1/2 湿化蒸馏水的质量。膨润土试样的基本性质如表 1 所示。

1.2 渗透溶液的制备与基本性质

将分析纯  $\text{CaCl}_2$  溶于去离子水中, 分别配制浓度为 0.05, 0.25 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液, 用于模拟不同水泥掺量的水泥固化体在不同淋滤阶段的淋滤液。Lo 等<sup>[21]</sup>和 Catalan 等<sup>[22]</sup>开展的水泥固化体淋滤试验(动态或静态)显示, 水泥固化体淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度因水泥掺入量的多少和淋滤时间的长短而不同; 他们在各自试验中发现, 水泥固化体淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度约在  $0.05\pm 0.0125\text{ mol/L}$ 。考虑到蒸发等因素,  $\text{Ca}^{2+}$  在淋滤液的浓度可能还会更高, 所以试验中还配制了  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0.25 mol/L 的淋滤液, 以模拟极端不利情况。两种淋滤液的基本特性如表 2 所示。

表 1 GCL 试样基本物理性质及试验设计

Table 1 Physical characteristics of GCL samples and test programs

样品	直径 /mm	质量 /g	厚度 /mm	GCL 试样体积 / $\text{cm}^3$	GCL 内固体体积 / $\text{cm}^3$	初始孔隙比	预水化液体	渗透液体
GCL1	101±1	45.19	6.51	52.13	17.35	2.00	自来水	0.05 mol/L $\text{CaCl}_2$
GCL2	101±1	38.55	5.92	47.41	15.13	2.13	自来水	0.25 mol/L $\text{CaCl}_2$



表 2 固化体淋滤液特性

Table 2 Chemical compositions and characteristics for simulated leachates from stabilization, solidification products

固化体淋滤液	电导率 /(mS·cm <sup>-1</sup> )	pH	离子强度 /(mol·L <sup>-1</sup> )	RMD* mmol <sup>1/2</sup>
0.05 mol/L CaCl <sub>2</sub>	10.54	5.32	0.125	0
0.25 mol/L CaCl <sub>2</sub>	44.30	5.86	0.625	0

注：\*RMD (ratio of the concentrations of monovalent and divalent cations)：溶液中一价阳离子浓度与二价阳离子浓度的平方根之比，因溶液中几乎不含有一价阳离子，所以两溶液的 RMD 均为 0。

1.3 渗透系数测定试验

渗透系数测定试验参照 ASTM D 6766<sup>[23]</sup>进行。首先将裁剪好的 GCL 试样装入到柔性壁渗透仪压力室的底座上；为防止 GCL 中膨润土流失堵塞管线，同时也为了使渗透溶液更加均匀地通过 GCL，在 GCL 的上下两端分别放置滤纸和透水石（形状和面积与 GCL 相同）。将柔性壁渗透仪压力室组装，向其中充水，并施加围压 35 kPa（5.0 psi）。将柔性壁渗透仪控制面板液位管中的自来水引入到进液管和出液管中，排出管中空气。在进液端施加 21 kPa（3.0 psi）的压力，出液端阀门处于关闭状态，对 GCL 试样进行为期 48 h 的预水化。随后，打开出液端阀门，开始渗透试验，测定 GCL 的基准渗透系数，渗透系数计算方法为

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中  $a$  为柔性壁渗透仪供水管断面面积（cm<sup>2</sup>）； $L$  为 GCL 试样的厚度（cm）； $A$  为 GCL 试样的断面面积（cm<sup>2</sup>）； $t_1$  和  $t_2$  分别为试验起始和终止时间（s）； $h_1$  和  $h_2$  分别为  $t_1$  和  $t_2$  时刻所对应的水头（cm）。

待基准渗透系数测定完成后，将 GCL 从柔性壁渗透仪的压力室中取出，测定其厚度，此厚度用于计算 GCL 的孔隙体积。

随后，将 GCL 试样连同滤纸和透水石一起再次安装到柔性壁渗透仪压力室中，充水并施加围压。将渗透液由自来水换成配制的 CaCl<sub>2</sub> 溶液。通过柔性壁渗透仪控制面板调节围压和渗透压，分别在有效应力为 24 kPa（3.5 psi），93 kPa（13.5 psi），162 kPa（23.5 psi），231 kPa（33.5 psi）和 438 kPa（63.5 psi）条件下测定 GCL 的渗透系数。24 kPa 有效应力用于模拟填埋场运营初期 GCL 所受荷载；在此阶段，GCL 所受荷载主要来自水泥固化体和填埋场淋滤液导排系统（假设此时水泥固化体填埋厚度为 1.0 m，固化体密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup>，则 1.0 m 厚固化体产生的荷载为 14 kPa；淋滤液导排系统产生荷载设定为 10 kPa）。随着水泥固化体填埋厚度增加，GCL 所受荷载必将不断增大。试验中设定的最大有效应力为 438 kPa，用于模拟水泥固化体填埋厚度为 30 m 时 GCL 所受荷载（30 m 厚的水泥固

化体产生荷载约为 420 kPa，加上淋滤液导排系统荷载 10 kPa，此时总荷载约为 430 kPa，为便于仪器控制，设定为 438 kPa）。事实上，随着水泥固化体填埋厚度的增加，GCL 上部荷载还会继续增大，但为防止柔性壁渗透仪压力室因压力过高而爆裂，有效应力不再继续增大。水泥固化体淋滤液作用下渗透系数计算方法与基准渗透系数计算方法相同。在试验中，收集水泥固化体渗出力，当其体积大于 10 mL 时，使用电导率仪测定其电导率（electrical conductivity，EC）。

2 试验结果：CaCl<sub>2</sub> 作用下 GCL 的渗透系数

固化体淋滤液作用下 GCL 渗透系数变化情况如图 1 所示。图 1 中横坐标为渗透的溶液量，用 GCL 孔隙体积的倍数表示，由图 1 可知，CaCl<sub>2</sub> 溶液的持续渗透使 GCL 的渗透系数迅速升高，GCL1 和 GCL2 的渗透系数分别升高至  $8.00 \times 10^{-9}$ ， $3.23 \times 10^{-8}$  m/s，比相同有效应力条件下使用自来水渗透时高 179 倍和 721 倍（自来水渗透试验数据来自文献[24]）。不同有效应力条件下的试验结果示于表 3，可见随着有效应力的持续增加，GCL 的渗透系数不断减小，其中，当有效应力增大至 438 kPa 时，GCL1 和 GCL2 的渗透系数已经低于其基准渗透系数（24 kPa 有效应力下使用自来水渗透时的渗透系数）。

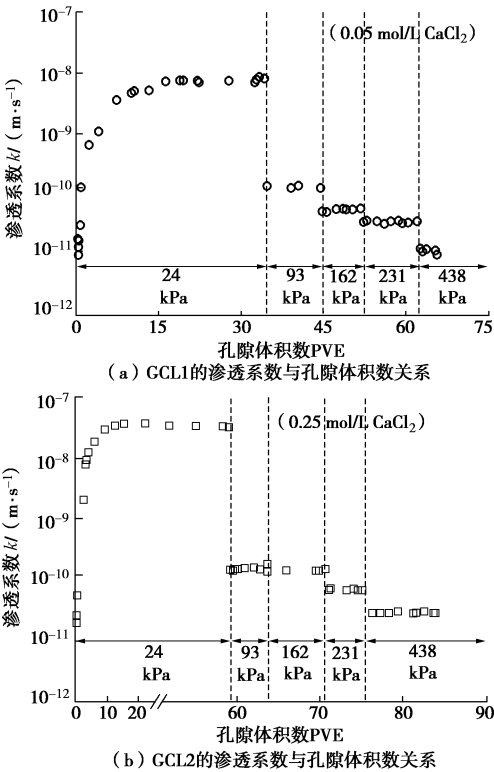


图 1 渗透系数与孔隙体积数关系

Fig. 1 Hydraulic conductivities of GCLs versus pore volumes of flow

表 3 试验结果  
Table 3 Test results

试验段	有效应力/kPa	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )*			$\frac{k_{\text{GCL2}}}{k_{\text{GCL1}}}$	$\frac{k_{\text{GCL1}}}{k_{\text{水}}}$	$\frac{k_{\text{GCL2}}}{k_{\text{水}}}$
		GCL1	GCL2	GCL 水**			
1	24	$8.00 \times 10^{-9}$	$3.23 \times 10^{-8}$	$4.48 \times 10^{-11}$	4.04	179	721
2	93	$1.27 \times 10^{-10}$	$1.46 \times 10^{-10}$	$2.57 \times 10^{-11}$	1.15	4.94	5.68
3	162	$5.74 \times 10^{-11}$	$1.45 \times 10^{-10}$	$1.21 \times 10^{-11}$	2.53	4.74	11.98
4	231	$3.52 \times 10^{-11}$	$6.77 \times 10^{-11}$	$7.55 \times 10^{-12}$	1.92	4.66	8.97
5	438	$9.88 \times 10^{-12}$	$2.83 \times 10^{-11}$	$1.83 \times 10^{-12}$	2.86	5.40	15.46

注: \*各有效应力试验段终止前渗透系数; \*\*使用自来水作为渗透溶液时测定的渗透系数。

从表 3 中可以看出, 在各个有效应力试验段, GCL2 的渗透系数都比 GCL1 大, 这是因为 GCL2 对应的淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度高于 GCL1, 而  $\text{Ca}^{2+}$  浓度越高, 膨润土黏粒中被  $\text{Ca}^{2+}$  置换掉的  $\text{Na}^{+}$  越多, 膨润土黏粒双电层越薄, 使得 GCL 中可供淋滤液通过的孔隙通道越多, 最终导致渗透系数越大。

3 讨 论

3.1 固化体淋滤液对 GCL 渗透系数的影响

固化体淋滤液作用下 GCL 的渗透系数之所以会升高, 是因为淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  能够与膨润土黏粒晶层间(可交换电位上)的  $\text{Na}^{+}$  发生离子交换, 这一交换过程导致膨润土黏粒的双电层厚度减小, 从而使 GCL 中可供淋滤液通过的孔隙通道体积增大, 在宏观上表现为 GCL 渗透系数升高<sup>[6, 25]</sup>。另外, 膨润土黏粒的双电层变薄, 黏粒间斥力减小, 膨润土黏粒容易发生聚沉, 使 GCL 中的微孔隙发展成大孔隙, 增加淋滤液流通空间, 进一步促使 GCL 的渗透系数增大<sup>[26-27]</sup>。

3.2 有效应力的影响

图 2 是有效应力与渗透系数之间的关系, 随着有效应力的增大, GCL 的渗透系数不断减小。Bradshaw 等<sup>[8]</sup>、Perov 等<sup>[28]</sup>、Petrov 等<sup>[18]</sup>以及 Thile 等<sup>[29]</sup>在研究中也发现, GCL 的渗透系数会随着有效应力的增大而不断减小。需要指出的是, 当有效应力在 93~438 kPa 时, GCL 的渗透系数与有效应力在半对数坐标上呈现出较好的线性负相关关系(GCL1 和 GCL2 的拟合决定系数分别为 0.99 和 0.95)。研究所得到的拟合公式可以用于计算不同有效应力条件下 GCL 的渗透系数, 依据此渗透系数, 填埋场运行和管理机构可以根据填埋场废弃物填埋的厚度计算出淋滤液的渗漏量, 从而对固化体填埋场的环境风险做出准确评估。

根据固结理论, 随着有效应力增大, 膨润土孔隙中的溶液被挤出, 孔隙体积减小, 最终促使 GCL 的渗透系数降低。GCL 孔隙比减小可以通过它们的  $e - \lg p$  曲线加以证实(图 3), 图中, 随着有效应力的增大,

GCL 的孔隙比(呈线性)不断减小。GCL 的渗透系数随有效应力增大而不断减小的现象具有重要的现实意义, 这意味着, 在填埋场中, 尽管固化体淋滤液对 GCL 的防渗性能会产生负面影响, 但这种负面影响可以被固化体所产生的上部荷载削弱甚至完全抵消, 这为 GCL 在固化体填埋场中应用提供了数据支撑。

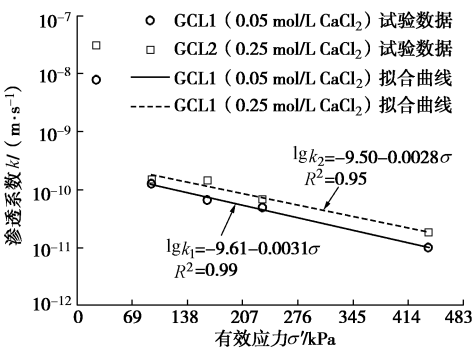


图 2 有效应力与渗透系数关系

Fig. 2 Hydraulic conductivity versus effective stress for GCLs

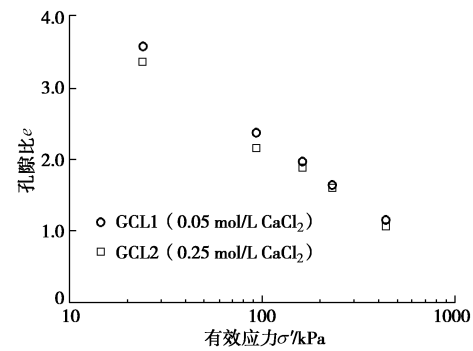


图 3 GCL 孔隙比与有效应力之间关系

Fig. 3 Compression indices for GCLs in this study

3.3 GCL 渗透系数的预测

在实验室内, 使用化学溶液测定 GCL 的渗透系数比使用蒸馏水或自来水测定 GCL 的渗透系数要复杂的多, 不仅需要特殊的耐腐蚀设备, 而且耗时极长。为此, Kolstad 等<sup>[30]</sup>提出, 可以首先使用去离子水测定 GCL 的渗透系数, 然后结合化学溶液的特性, 对化学溶液作用下 GCL 的渗透系数进行预测, 以减少实验室

表 4 GCLs 的实测与预测值  
Table 4 Predicted versus measured hydraulic conductivities for GCLs

有效应力/ kPa	GCL1			GCL2		
	实测 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	预测 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	实测 $k$ /预测 $k$	实测 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	预测 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	实测 $k$ /预测 $k$
24	$8.00\times 10^{-9}$	$8.98\times 10^{-11}$	89.21	$3.23\times 10^{-8}$	$2.01\times 10^{-10}$	160.86
93	$1.27\times 10^{-10}$	$5.24\times 10^{-11}$	2.42	$1.46\times 10^{-10}$	$1.17\times 10^{-10}$	1.24
162	$5.74\times 10^{-11}$	$2.52\times 10^{-11}$	2.67	$1.45\times 10^{-10}$	$5.64\times 10^{-11}$	2.56
231	$3.52\times 10^{-11}$	$1.59\times 10^{-11}$	3.15	$6.77\times 10^{-11}$	$3.56\times 10^{-11}$	1.90
438	$9.88\times 10^{-12}$	$4.05\times 10^{-12}$	2.44	$1.83\times 10^{-11}$	$9.07\times 10^{-12}$	2.02

测试工作量; Kolstad 等<sup>[30]</sup>在分析大量的实测数据后, 给出了经验性预测方程:

$$\frac{\lg k_c}{\lg k_{DI}} = 1.085 - 1.097I + 0.0398I^2 R_{MD} \quad (2)$$

式中  $k_c$  为化学溶液作用下 GCL 的渗透系数 (m/s);  $k_{DI}$  为去离子水作用下 GCL 的渗透系数 (m/s);  $I$  为化学溶液的离子强度 (mol/L);  $R_{MD}$  为化学溶液中一价阳离子摩尔浓度与二价阳离子摩尔浓度的平方根之比 ( $\text{mmol}^{1/2}$ )。

因为方程 (2) 仅适用于离子强度  $I$  介于 0.05~0.5 mol/L,  $R_{MD}$  小于 2.0  $\text{mmol}^{1/2}$  的化学溶液, 根据固化体淋滤液的特性 (见表 2), GCL1 的渗透系数可以使用公式 (2) 进行预测。将 GCL1 所用固化体淋滤液 (0.05 mol/L  $\text{CaCl}_2$ ) 的  $I$  和  $R_{MD}$  以及自来水作用下 GCL 的渗透系数 (已有研究表明, 自来水作用下 GCL 的渗透系数与去离子水作用下的渗透系数相差不大) 代入方程 (2), 计算 GCL1 的渗透系数, 并将其与实测值进行比较, 结果见表 4 和图 4。从表 4 中可以看出, 除了有效应力 24 kPa 外, 其他有效应力下计算所得到的渗透系数均与实测值接近, 偏差在 4 倍以内。因此, 使用方程 (2) 可对 GCL1 的渗透系数做出较为准确的预测。

尽管 GCL2 的渗透系数不能直接使用方程 (2) 进行预测 (0.25 mol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液的  $I$  为 0.625 mol/L, 见表 2, 大于 0.5 mol/L), 但 Egloffstein<sup>[31]</sup>曾提到, 膨润土黏粒双电层压缩与渗透溶液中电解质浓度的平方根成正比:

$$k \propto [n_0 v^2 / D]^{1/2} \quad (3)$$

式中  $k$  为渗透系数;  $n_0$  渗透溶液中电解质的浓度;  $v$  为渗透溶液中阳离子的化合价;  $D$  为渗透溶液的介电常数。

因为 GCL2 所用淋滤液的浓度比 GCL1 所用淋滤液的浓度高 5 倍, 根据式 (3), GCL2 的渗透系数应该比 GCL1 的渗透系数大 2.24 倍。所以, 将 GCL1 的预测渗透系数乘以 2.24 即为 GCL2 的预测渗透系数 (见表 4); 将其与 GCL2 的实测值进行比较后可以看

出 (见表 4 和图 4): 除了 24 kPa 外, 其他有效应力下 GCL2 的预测值与实测值非常接近, 偏差不超过 3 倍。综合以上分析, 在本研究所使用的有效应力范围内 (24 kPa 除外, 后文讨论), 固化体淋滤液作用下 GCL 的渗透系数是可以进行预测的。

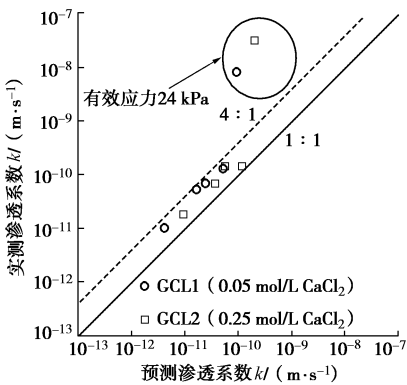


图 4 GCL 预测渗透系数与实测渗透系数  
Fig. 4 Predicted versus measured hydraulic conductivities for GCLs

在 24 kPa 有效应力下, GCL 实测的渗透系数要远远大于预测的渗透系数 (见表 4 和图 4)。Shackelford 等<sup>[13]</sup>在使用公式预测矿山废弃物淋滤液作用下 GCL 的渗透系数时, 也发现了同样的问题, 但并未对此现象进行详细解释。在低有效应力条件下, GCL 的渗透系数实测值远远高于预测值可能是因为: 除了膨润土黏粒双电层压缩以外, 还存在其他机制促使 GCL 的渗透系数升高 (例如, 优势流或者淋滤溶蚀), 而这些机制在式 (2) 中并没有得到体现 (Kolstad 等<sup>[30]</sup>在建立式 (2) 时将 GCL 的渗透系数变化归因于膨润土黏粒双电层压缩)。但当有效应力增大后, 导致 GCL 渗透系数增大的其它机制 (例如, 优势流或者淋滤溶蚀) 可能都被抑制, GCL 渗透系数的增大主要是因为膨润土黏粒双电层压缩, 所以可以使用式 (2) 进行预测。

4 结 论

(1) 当有效应力为 24 kPa 时, 固化体淋滤液持续渗透导致 GCL 的渗透系数升高 179~721 倍; 在研

究所使用的两种浓度范围内,淋滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度越高, GCL 渗透系数增大的幅度越大。

(2) 通过增大有效应力,可以降低固化体淋滤液对 GCL 防渗性能所造成的负面影响。当有效应力增大至 438 kPa 时,固化体淋滤液作用下 GCL 的渗透系数低于其基准渗透系数,淋滤液对 GCL 防渗性能所造成的负面影响全部被消除。

(3) 0.05 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液作用下 GCL 的渗透系数可以使用 Kolstad 等<sup>[30]</sup> 所提出的经验方程直接预测; 0.25 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  溶液作用下 GCL 的渗透系数可以联合使用 Kolstad 等<sup>[30]</sup> 和 Egloffstein<sup>[31]</sup> 提出的方程进行预测。

### 参考文献:

- [1] 杜延军, 金 飞, 刘松玉, 等. 重金属工业污染场地固化/稳定处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 116 - 124. (DU Yan-jun, JIN Fei, LIU Song-yu, et al. Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 116 - 124. (in Chinese))
- [2] 唐 强, 潘玲玲, 高玉峰, 等. 飞灰固化工程材料在碳化条件下的强度及环境特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 645 - 654. (TANG Qiang, PAN Ling-ling, GAO Yu-feng, et al. Strength and environmental behaviors of solidified fly ash under carbonation effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 645 - 654. (in Chinese))
- [3] 林伟岸, 詹良通, 陈云敏, 等. GCL/GM 界面膨润土挤出机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 832 - 837. (LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Mechanism of bentonite extrusion of GCL/GM interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 832 - 837. (in Chinese))
- [4] 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. (LI Zhi-bin, XU Chao. Swelling characteristics and hydraulic properties of GCLs under vertical stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1876 - 1880. (in Chinese))
- [5] BOUAZZA A. Geosynthetic clay liner[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, **20**(1): 3 - 17.
- [6] SHACKELFORD C D, BENSON C H, KATUMI T, et al. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, **18**(2/3/4): 133 - 161.
- [7] RUBL J L, DANIEL D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(4): 369 - 381.
- [8] BRADSHAW S L, BENSON C H, RAUEN T L. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to recirculated municipal solid waste leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(2): 4015074.
- [9] SHAN H Y, LAI Y J. Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, **20**(1): 19 - 38.
- [10] GUYONNET D, TOUZE-FOLTZ N, NOROTTE V, et al. Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(5): 321 - 331.
- [11] LANGE K, ROWE R K, JAMIESON H. The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(2): 199 - 205.
- [12] LANGE K, ROWE R K, JAMIESON H. Metal retention in geosynthetic clay liners following permeation by different mining solutions[J]. Geosynthetics International, 2007, **14**(3): 178 - 187.
- [13] SHACKELFORD C D, SEVICK G W, EYKHOLT G R. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(2): 149 - 162.
- [14] NAKA A, KATSUMI T, FLORES G, INUI T, et al. Evaluation of mineral barriers against acid rock drainage[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2012, **43**(3): 35 - 42.
- [15] CHEN J N, BENSON C H, EDIL T B. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners with sodium bentonite to coal combustion product leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(3): 4018008.
- [16] SETZ M C, TIAN K, BENSON C H, et al. Effect of ammonium on the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(6): 665 - 673.
- [17] LIU Y, BOUAZZA A, GATES W P, et al. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners to sulfuric acid solutions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(1): 14 - 23.
- [18] PETROV R J, ROWE R K, QUIGLEY R M. Selected factors

- influencing GCL hydraulic conductivity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(8): 683 – 695.
- [19] KANG J B, SHACKELFORD C D. Consolidation of a geosynthetic clay liner under isotropic states of stress[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **136**(1): 253 – 259.
- [20] DANIEL D E, BOWDERS J J, GILBERT R B. Laboratory hydraulic conductivity testing of GCLs in flexible-wall permeameters[M]// *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners*. STP 1308. West Conshohocken: ASTM, 1997: 208 – 226.
- [21] LO I M, TANG C, LI X, POON C. Leaching and microstructural analysis of cement-based solidified wastes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(23): 5038 – 5042.
- [22] CATALAN L J J, MERLIÈRE E, CHEZICK C. Study of the physical and chemical mechanisms influencing the long-term environmental stability of natrojarosite waste treated by stabilization/solidification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, **94**(1): 63 – 88.
- [23] ASTM D 6766-12 Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible aqueous solutions[S]. 2012.
- [24] 王 宝, 董兴玲. 不同有效应力下矿山渗滤液对土工合成黏土衬垫渗透特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(5): 1350 – 1358. (WANG Bao, DONG Xing-ling. Hydraulic conductivity of mine leachate through geosynthetic clay liners under different effective stresses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(5): 1350 – 1358. (in Chinese))
- [25] 许四法, 吴雪辉, 胡 琦, 等.  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度对膨润土掺砂混合土渗透性能的影响[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(6): 1145 – 1150. (XU Si-fa, WU Xue-hui, HU Qi, et al. Influence of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration on hydraulic properties of bentonite-sand mixtures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(6): 1145 – 1150. (in Chinese))
- [26] 杨玉玲, 杜延军, 范日东, 等. 膨润土系隔离墙材料渗透特性研究综述[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(增刊 2): 210 – 216. (YANG Yu-ling, DU Yan-jun, FAN Ri-dong, et al. Advances in permeability for bentonite-based hydraulic containment barriers[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(S2): 210 – 216. (in Chinese))
- [27] 朱 伟, 徐浩青, 王升位, 等.  $\text{CaCl}_2$ 溶液对不同黏土基防渗墙渗透性的影响[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(5): 1224 – 1231. (ZHU Wei, XU Hao-qing, WANG Sheng-wei, et al. Influence of  $\text{CaCl}_2$  solution on the permeability of different clay-based cutoff walls[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(5): 1224 – 1231. (in Chinese))
- [28] PETROV R J, ROWE R K. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(6): 863 – 885.
- [29] THIEL R S, CRILEY K. Hydraulic conductivity of partially prehydrated GCLs under high effective confining stresses for three real leachates[C]// Alshawabkeh A. *Waste Containment and Remediation*. GSP 142. Austin, 2005: 1 – 11.
- [30] KOLSTAD D, BENSON C, EDIL T. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(12): 1236 – 1249.
- [31] 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**(7): 427 – 444.