

渗沥液污染下水泥固化高岭土透水及变形特性

张 芊¹, 陆海军^{*1,2}, 李继祥¹, 张 雄¹

(1. 武汉轻工大学 多孔介质力学研究所, 湖北 武汉 430023;

2. 大连理工大学 土木工程学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对填埋场衬垫在高荷载作用下开裂破坏的现状, 采用水泥固化高岭土, 评价其抗渗、抗开裂及固结压缩特性, 探究其作为填埋场衬垫材料的可行性. 采用纯高岭土与水泥掺量5%、10%、15%的固化高岭土进行试验, 室内模拟填埋场衬垫受渗沥液污染的工况, 通过渗透试验测定水力传导系数, 分析其抵抗污染物渗透能力; 通过固结试验测定压缩系数, 分析其固结压缩特性; 通过干湿循环开裂试验测定开裂因子, 分析其抵抗开裂变形特性. 结果表明: 试样水力传导系数随时间增加而下降, 其中纯高岭土下降40.4%, 而水泥固化后高岭土仅下降16.0%~27.1%. 由于试验高岭土属于中压缩性土, 试样孔隙比随荷载压力上升而下降, 水泥掺量越多, 孔隙比下降越少, 200 kPa 荷载下, 0.25~64 min 的轴向位移变化量占总变化量的65.1%~70.7%; 掺入水泥后试样的开裂面积明显减小, 最大开裂因子降幅达52.6%, 水泥掺量10%与15%的试样开裂因子差别较小. 水泥固化后高岭土的强度及抗开裂能力提高, 满足作为填埋场衬垫材料的要求.

关键词: 水泥; 高岭土; 渗沥液; 渗透; 变形

中图分类号: X53; TU411 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201605011

0 引言

现今垃圾填埋场安全运行问题已越来越得到重视^[1]. 黏土衬垫是填埋场的重要组成部分, 全国正在运行的填埋场有935座, 其中34%没有采取防渗措施, 剩余部分约90%的填埋场防渗系统存在不同程度的破坏^[2], 研究更安全可靠填埋场衬垫材料越发成为科学工作者们关注的焦点.

许多学者^[3-5]尝试采用秸秆纤维、赤泥、粉煤灰等材料对黏土进行改性. 高岭土作为一种金属矿产, 是以高岭石族黏土矿物为主的黏土和黏土岩, 能够吸附渗沥液中的有机污染物. 张永利等^[6]采用煅烧、酸浸对高岭土进行改性后, 考察了其Cr(VI)的吸附特性; 杜延军等^[7]、陈蕾等^[8]利用水泥固化高岭土, 并对其吸附铅、锌等金属离子的能力以及无侧限抗压强度进行了试验研究. 衬垫材料的渗透特性、长期荷载下的变形及开裂特性是

考察填埋场稳定性的重要因素, 国内外对此方面的研究仍然较少.

为了探究水泥固化渗沥液污染高岭土的抗渗、抗开裂及压缩特性, 评估其作为填埋场衬垫材料的可行性, 本文模拟填埋场黏土衬垫工况, 针对水泥固化渗沥液污染高岭土, 采用渗透试验分析土样的抗渗能力, 采用固结试验观察土样的固结压缩特性, 采用开裂试验研究干湿循环下土样的抗开裂能力.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用高岭土产自湖南衡阳某高岭土矿中, 取样后, 未经物理化学方式处理. 其化学成分组成及基本物理性质如表1、2所示. 其属软质高岭土, 击实曲线如图1所示, 可以看出, 所取高岭土的最大干密度为1.64 g/cm³, 最优含水率为

收稿日期: 2016-02-28; 修回日期: 2016-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474168, 11672216); 中国科学院岩石力学与工程国家重点实验室开放研究课题(Z014007, Z015006); 湖北省百人计划资助项目.

作者简介: 张 芊(1993-), 女, 硕士生, E-mail: zq_whpu@163.com; 陆海军^{*}(1979-), 男, 博士, E-mail: lhj_whpu@163.com.

21.8%。

表 1 高岭土的化学成分

Tab. 1 The chemical compositions of kaolin			
化学成分	质量分数/%	化学成分	质量分数/%
SiO ₂	44.72	Al ₂ O ₃	39.48
K ₂ O	0.22	Na ₂ O	0.07
CaO	0.41	Fe ₂ O ₃	0.29
其他	14.81		

表 2 高岭土的基本物理性质

Tab. 2 The basic physical properties of kaolin				
天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然含水 率/%	液限 W _l /%	塑限 W _p /%	塑性 指数
2.55	21.71	49.5	20.8	28.7
相对密度 水力传导系数/(10 ⁻⁸ cm·s ⁻¹)				
2.66		6.1		

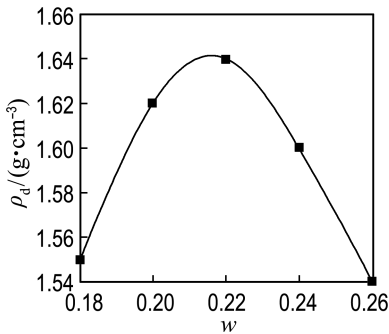


图 1 高岭土的击实曲线

Fig. 1 The compaction curve of kaolin

试验高岭土的扫描电镜照片与孔容-孔径分布如图 2、3 所示。可以看出，土样颗粒呈大残片状，不规则排列，且残片间存在较大空隙，孔径分布呈双肩峰态势，3 nm 与 8 nm 的孔径占比较大，总孔容为 0.160 3 cm³/g。

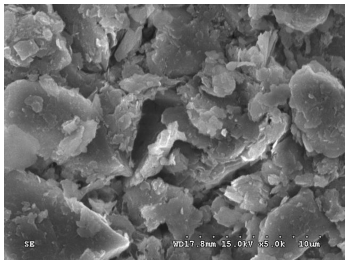


图 2 高岭土的扫描电镜照片

Fig. 2 The SEM image of kaolin

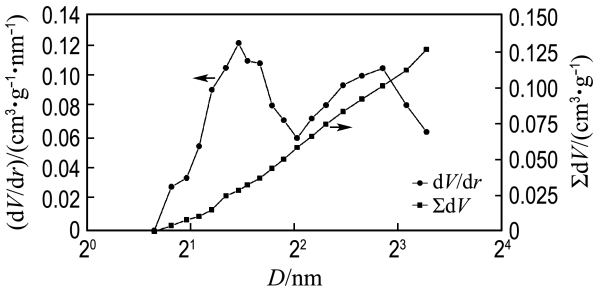


图 3 高岭土的孔容-孔径分布曲线

Fig. 3 The distribution curves of pore volume and pore size of kaolin

试验所用水泥为陕西省秦岭水泥股份有限公司所生产的 425 号普通硅酸盐水泥，经检测其各项性质指标符合通用国家标准^[9]，具体各项数值如表 3 所示。试验所用渗沥液取自武汉市陈家冲生活垃圾填埋场，其基本化学性质指标如表 4 所示。

表 3 水泥的基本性质指标

Tab. 3 The basic properties of cement								
不溶物/%	烧失量/%	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/		抗压强度/		抗折强度/	
			min		kPa		kPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
0.39	2.2	343	122	356	18.6	46.2	3.9	7.2

表 4 填埋场渗沥液的化学性质指标

Tab. 4 The chemical properties of landfill leachate		
项目	数值	测定方法
pH	6.1	GB/T 6920—1986
DO 含量/(mg·L ⁻¹)	3.7	GB/T 7489—1987
N-NO ₃ ⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	16.57	HJ/T 346—2007
N-NO ₂ ⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	0.50	HJ/T 197—2005
N-NH ₄ ⁺ 含量/(mg·L ⁻¹)	2 779.9	HJ 666—2013
P-PO ₄ ³⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	21.2	HJ 669—2013
TP 含量/(mg·L ⁻¹)	25.5	HJ 671—2013
BOD ₅ 含量/(mg·L ⁻¹)	1 457.1	HJ 505—2009
COD 含量/(mg·L ⁻¹)	4 107	HJ/T 399—2007
TOC 含量/(mg·L ⁻¹)	692.5	HJ 501—2009
SO ₄ ²⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	5.8	GB/T 13196—1991
Cl ⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	2 022.9	GB/T 11896—1989
Na ⁺ 含量/(mg·L ⁻¹)	1 855.6	GB/T 11904—1989

1.2 试验方法

将试验所需高岭土人工破碎，通过 2 mm 标准筛后取出土样，置于真空干燥箱内，调节温度为 105 ℃，并每隔 2 h 称取土样质量，至两次称取质量变化量小于 0.2% 后，视为土样已烘干，装入密

封袋内密封备用. 试验用水泥的预处理方法同高岭土.

1.2.1 渗透试验 根据美国实验标准 ASTM D 5084 及 ASTM D 7100, 在室温 25 ℃ 下, 采用柔性壁渗透仪对不同水泥掺量 (0%、5%、10%、15%) 的高岭土试样进行渗透试验, 计算不同时间时的水力传导系数. 试验前, 将试样置于真空饱和缸中, 保持真空状态 48 h 后, 向内注入清水进行预饱和, 使试样孔隙内充满水分, 采用垃圾渗沥液原液进行渗透试验, 试验中, 除水头压力外对试样不施加其他外力. 试验所用圆柱形模具内径为 50 mm, 有效高度为 100 mm, 试样围压保持在 100 kPa, 渗透压控制在 80 kPa, 使膜紧贴试样, 防止溶液侧漏.

水力传导系数由下式计算:

$$k = \frac{Q \times L \times \rho \times g}{A \times t \times p} \times 10^{-5}$$

式中: k 表示试样的水力传导系数 (cm/s); Q 表示试验中的出水量 (m³); L 表示试样厚度 (cm); ρ 表示渗沥液的密度 (kg/m³); A 表示试样断面面积 (cm²); t 表示试验所经历的时间 (s); p 表示渗透压 (kPa); g 为重力加速度 (9.85 N/kg).

1.2.2 固结试验 将已干燥的高岭土置于垃圾渗沥液中浸泡 28 d, 而后取出烘干, 并再次破碎, 过 2 mm 标准筛, 掺入不同含量的水泥 (0%、5%、10%、15%) 后在标准环刀中制成直径 61.8 mm、高 20 mm 的试样, 制样时确保试样处于最大干密度与最优含水率条件. 将试样置于密封袋内密封保存养护, 控制温度为 40 ℃. 28 d 后, 取出试样, 根据《土工试验规程》^[10], 采用 WG 型单杠杆固结仪 (南京宁曦土壤仪器有限公司) 进行固结试验, 记录荷载压力为 12.5、25、50、100、200、400、800 kPa 下各试样的轴向位移. 采用孔隙比来表征试样孔隙的密实程度, 其代表材料中孔隙体积与材料中颗粒体积之比.

初始孔隙比计算公式如下:

$$e_0 = \frac{G_s (1 + w_0) \rho_w}{\rho_0} - 1$$

式中: e_0 表示试样的初始孔隙比; G_s 表示试样相对密度; w_0 表示试样初始含水率 (%); ρ_0 表示试样的初始密度 (g/cm³); ρ_w 表示水的密度 (g/cm³).

固结稳定后试样的孔隙比计算公式如下:

$$e_i = e_0 - \frac{\sum \Delta h_i}{h_s}$$

式中: e_i 表示某级压力下的孔隙比; $\sum \Delta h_i$ 表示某级压力下试样高度的累计变形量 (cm); h_s 表示试样净高 (cm).

1.2.3 开裂试验 土样处理方法同固结试验. 在标准环刀中制成直径 61.8 mm、高 20 mm 的试样后, 采用刮土刀刮去表面多余土颗粒使试样表面保持平整, 养护 28 d 后取出. 采用数码显微摄像系统每间隔 10 min 拍摄试样表面照片 (放大倍数为 10), 如图 4 所示, 同时实时称取试样质量, 至 24 h 质量相差小于 0.2 g 时认为质量恒定, 并在试样表面加水至表面湿润, 记录加水前后质量, 继续拍摄试样照片, 4 次干湿循环后试验完毕. 采用数码显微摄像分析软件分析加水前后试样表面开裂面积, 并采用开裂因子 (CIF) 表征试样开裂情况, 其计算公式如下:

$$CIF = \frac{A_c}{A_t} = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} A_{ci}}{A_t}$$

式中: A_c 表示试样开裂部分的面积 (mm²), A_t 表示试样实时总面积 (mm²).

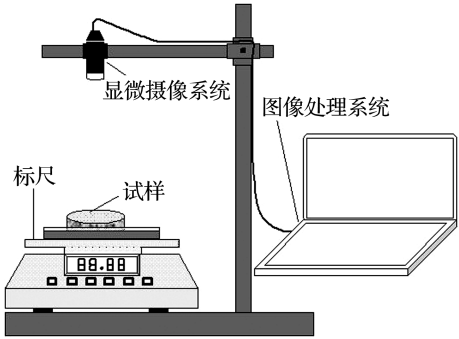


图 4 数码显微摄像装置

Fig. 4 The digital microscopic imaging device

每轮干湿循环试验中, 选取试验开始及结束时的照片各一张, 并根据各轮干湿循环的时间, 合理挑选另两张清晰度较高的照片进行分析, 以确保分析的准确性以及所选照片的代表性.

2 试验结果与分析

2.1 渗透特性

不同水泥掺量下固化高岭土试样的水力传导

系数如图 5 所示. 随着时间的增加, 水力传导系数呈下降趋势, 且存在较明显的波动. 试验初期, 水泥固化后试样的水力传导系数较纯高岭土试样小 14.0%~21.4%, 而试验末期各试样的水力传导系数在 $4.6\times 10^{-8}\sim 5.1\times 10^{-8}$ cm/s, 差别较小.

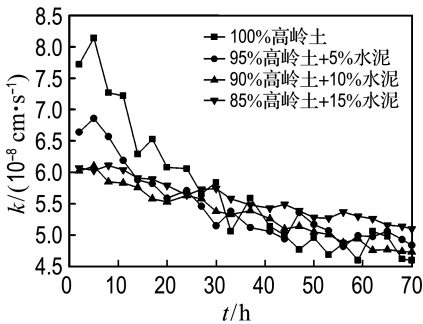


图 5 渗透试验水力传导系数曲线
Fig. 5 The curve of hydraulic conductivity in penetration test

国家标准^[11]中指出, 填埋场衬垫压实黏土的水力传导系数应小于 1×10^{-7} cm/s, 可以看出, 试验所得水力传导系数均满足要求. 由于高岭土组成中存在多种矿物质^[12], 在填埋场渗沥液的作用下, 高岭土中的矿物成分 Al_2O_3 等活泼金属氧化物与渗沥液中酸碱化学物质发生反应, 以离子形式溶于渗沥液中并下渗, 使土体产生膨胀, 随之产生少量气体. 受到渗沥液流动因素影响, 土颗粒中有机质受到冲刷, 孔隙表面更为光滑, 促进渗沥液下渗, 致使孔隙逐渐变大, 水力传导系数较大且产生波动现象. 而水泥抵抗渗沥液的侵蚀能力较强, 与土颗粒混合后能够延缓渗沥液对土体矿物质颗粒的侵蚀, 故试验初期水泥固化后试样的水力传导系数明显低于纯高岭土试样. 此外, 由于下层土体承受上层传递的轴向压力较大, 孔隙较小, 随着试验时间的增加, 下层土体受到上层冲刷而来的颗粒、微生物及有机物作用, 生物淤堵^[13-14]现象越来越明显, 土体中微小孔隙被堵塞, 阻滞渗沥液下渗, 促使水力传导系数减小, 最终逐渐趋于恒定.

2.2 固结压缩特性

不同水泥掺量下固化高岭土试样的孔隙比随荷载压力变化曲线如图 6 所示. 由图可知, 荷载压力为 12.5 kPa 时, 各试样孔隙比均在 0.943~0.958. 随着荷载压力的不断增大, 孔隙比逐渐下降, 同一压力下水泥掺量越多的试样其孔隙比相

对越大. 800 kPa 时, 纯高岭土试样的孔隙比为 0.710, 较 5% 水泥固化试样低 10.4%, 而随着水泥掺量继续增加, 各试样孔隙比差距逐渐减小, 10%、15% 水泥掺量试样的孔隙比仅分别较纯高岭土试样大 14.5%、17.0%.

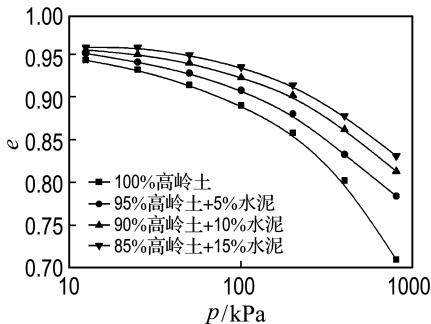


图 6 固结试验荷载压力-孔隙比曲线
Fig. 6 The curve of pressure-void ratio in consolidation test

高岭土作为一种常见的黏土矿物, 其中金属矿物质、硅酸盐矿物质含量较大, 多为晶体结构, 空间骨架支撑较为完善. 固结试验中, 在较低的荷载压力下, 骨架支撑结构未被破坏, 孔隙比相对较大, 而随着荷载压力的增大, 不同矿物质骨架逐渐达到其各自承载极限而出现骨架断裂现象, 空间结构被破坏, 致使大颗粒矿物质分散为小颗粒, 并在长时间的荷载压力下连结更为紧密, 孔隙比下降也更为明显^[15]. 经渗沥液污染的高岭土中, 土壤骨架受到腐蚀, 空间结构受到破坏, 添加水泥后, 水硬性胶凝材料凝结硬化后对骨架结构形成一定保护作用^[16], 使各矿物质骨架能够承受的最大荷载压力有所提升, 从而达到提升总体试样强度的效果. 当水泥掺量达到一定比例时, 水泥颗粒已能够完全包裹空间骨架结构, 同一荷载压力下水泥掺量的继续增加对孔隙比的提升, 即试样强度的增加效果趋于减弱, 故此时随着水泥掺量增加孔隙比差距逐渐减小.

图 7 所示为荷载压力 200 kPa 下不同水泥掺量固化高岭土试样的轴向位移随时间的变化曲线. 试验开始时, 各试样轴向位移为 0.52~0.79 mm, 试验开始 0.25 min 后, 轴向位移出现大幅下降, 至 64 min 后变化逐渐缩小趋于稳定, 试验中 0.25~64 min 的轴向位移变化量占总变化量的 65.1%~70.7%. 这是由于试验开始瞬间, 一部分

承压能力较差的骨架发生突然断裂,同时土体中原有的水分会由于压力作用而部分排出,致使出现较大的瞬时轴向位移;随着时间的增加,部分处于临界状态下的骨架结构无法支撑上部土体,在长时间的荷载压力作用下出现断裂现象,从而使轴向位移进一步增大^[17].而当试验时间大于 64 min 后,土体结构已逐渐趋于稳定,偶有骨架断裂现象发生,轴向位移也逐渐稳定.

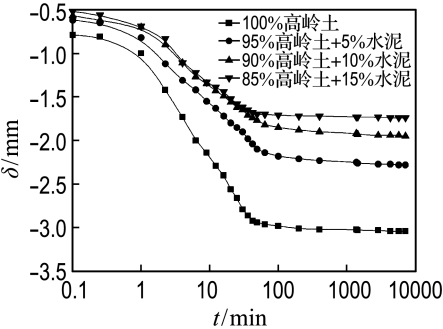


图 7 荷载压力 200 kPa 下轴向位移随时间变化曲线

Fig. 7 The axial displacement curve as time changes under the pressure of 200 kPa

试验所得压缩系数 α_{1-2} 与固结系数 C_v 如表 5 所示.由表可知,试验所用高岭土的压缩系数均处于 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}^{-1}$,属于中压缩性土^[18].随着水泥掺量的增加,固结系数出现小幅下降,则固结速率出现下降.这是由于水泥掺入增强各骨架承载力后,脆弱骨架断裂的时间较纯高岭土试样有所延后,轴向位移快速下降阶段所需时间略有增长,固结稳定时间延长,使平均固结速率出现下降.

表 5 固结试验参数

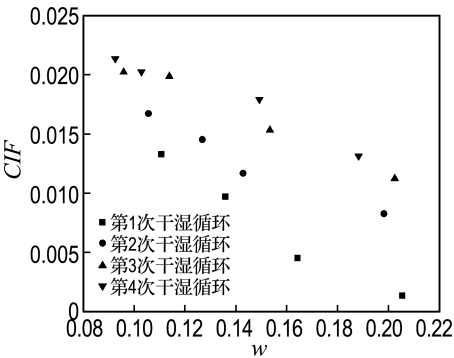
Tab. 5 The parameters in consolidation test

工况	$\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	$C_v/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
100%高岭土	0.32	2.320
95%高岭土+5%水泥	0.28	2.150
90%高岭土+10%水泥	0.21	2.015
85%高岭土+15%水泥	0.21	1.986

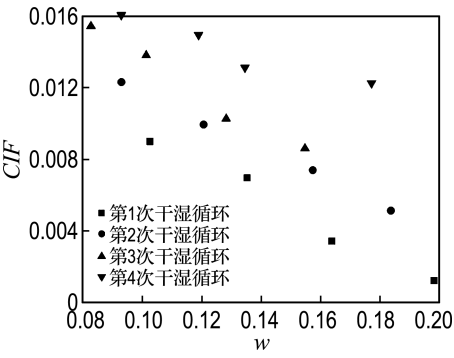
2.3 开裂特性

不同水泥掺量固化高岭土的开裂因子分布如图 8 所示,各干湿循环阶段最大开裂因子如图 9 所示.由图可见,养护完成开始试验时,试样表面开裂面积较小,开裂因子介于 $0.001\ 02 \sim$

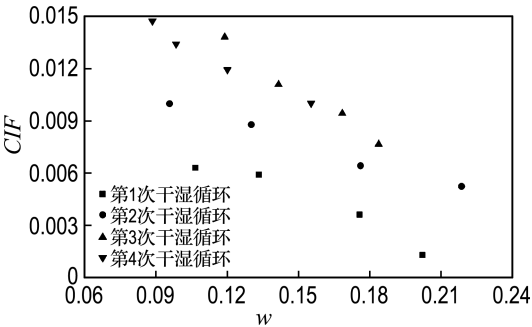
$0.001\ 37$;随着试验时间增加,开裂因子显著增大,干燥失水过程末期,开裂因子趋于平稳.试样表面加水后,开裂因子较前一次干燥失水末期时



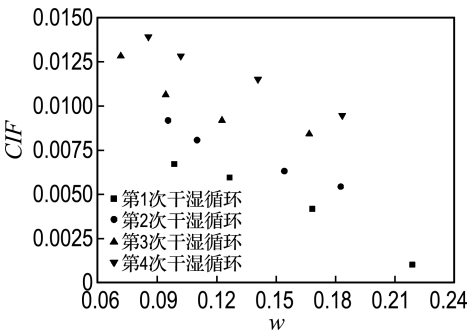
(a) 100%高岭土



(b) 95%高岭土+5%水泥



(c) 90%高岭土+10%水泥



(d) 85%高岭土+15%水泥

图 8 水泥固化高岭土开裂因子分布

Fig. 8 The CIF distribution of solidified kaolin with cement

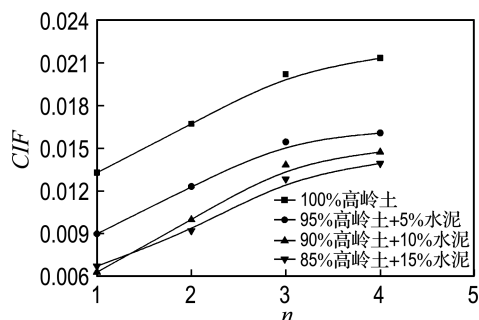


图9 水泥固化高岭土最大开裂因子

Fig. 9 The maximum CIF of solidified kaolin with cement

降低 8.3%~42.8%，随着试验继续进行，开裂因子继续增大。

试验过程中，试样表面的水分将会逐步挥发流失，孔隙水压力降低，高岭土中土颗粒与矿物颗粒之间距离增大，颗粒间原有的基质吸引力已无法支持其相互连结，从而在最为脆弱处化学键发生连续性断裂，产生空隙，使仍保持连结状态的颗粒间距离减小，阻止试样表面其余部分发生开裂。而随着试样水分的继续散失，不可避免地继续发生开裂，直至表面水分基本挥发完毕到达天然含水率。试样表面加水后，土颗粒间缺失的水分得到补给，孔隙水压力陡然上升，支撑颗粒间缺失的基质吸引力使土颗粒产生膨胀现象，故此时试样表面开裂面积有所降低，开裂因子减小，但由于突然增加的孔隙水压力有限，若已产生裂缝面积较大，裂缝将不会达到完全愈合状态，故开裂因子无法降低至 0。

试样各阶段的最大开裂因子是用来表征试样抗开裂特性的重要参数，可以看出，渗沥液污染高岭土添加 5% 水泥后，试样的最大开裂因子下降 23.6%~32.3%，而掺入 10% 水泥后，最大开裂因子下降幅度达 31.0%~52.6%，掺入水泥对抵抗试样开裂的效果极为明显。这是由水泥作为胶凝材料的性质所决定的，水泥自身吸收水分后将会发生颗粒重组现象从而产生较高强度，其均匀掺入高岭土中后骨架结构强度增强，当水分散失，土颗粒间基质吸引力降低时，水泥颗粒的黏结作用显现，从而达到抵抗试样表面开裂的效果^[19]。当水泥掺量达到一定比例时，水泥颗粒的黏结作用达到极限，抵抗开裂效果有限，故水泥掺量 15% 与 10% 时开裂因子差别较小。

3 结 论

(1) 渗透试验起始时，纯高岭土试样的水力传导系数为 7.72×10^{-8} cm/s，而水泥固化后试样水力传导系数为 $6.07 \times 10^{-8} \sim 6.64 \times 10^{-8}$ cm/s，较纯高岭土试样明显偏低。随着试验的进行，曲线产生明显抖动，最终各试样水力传导系数差别较小，均在 $4.6 \times 10^{-8} \sim 5.1 \times 10^{-8}$ cm/s，纯高岭土的水力传导系数下降 40.4%，而水泥固化后，其数值仅下降 16.0%~27.1%。

(2) 试验所用高岭土属于中压缩性土，随着荷载压力的上升，孔隙比下降，添加水泥后试样的孔隙比高于纯高岭土试样；荷载压力 800 kPa 下纯高岭土试样的孔隙比为 0.710，相同压力下水泥掺量 15% 试样的孔隙比达 0.831，水泥固化后试样强度上升，结构更为稳定。

(3) 每次干湿循环初期，开裂因子较前一次干燥失水过程末期时降低 8.3%~42.8%，水泥固化高岭土的最终开裂因子均处于 0.013 9~0.021 3。水泥固化后，试样的最大开裂因子明显降低，最大降幅达 52.6%，能有效降低开裂面积，起到抵抗土体开裂的效果。

(4) 水泥固化后高岭土试样存在较高的强度及抗开裂能力，且水力传导系数低于 1×10^{-7} cm/s，满足作为填埋场衬垫材料的要求。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 高 登, 朱 斌, 等. 垃圾填埋场沿衬垫界面的地震稳定性及永久位移分析[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2008, 38(1): 79-94.
CHEN Yun-min, GAO Deng, ZHU Bin, *et al.* The permanent displacement analysis and seismic stability along the interface of landfill liner [J]. *Scientia Sinica (Series E: Technologica)*, 2008, 38(1): 79-94. (in Chinese)
- [2] 何 卫. 秸秆纤维改良黏土作为填埋场衬垫防渗材料的可行性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013.
HE Wei. The feasibility study of straw fiber modified clay as impervious landfill liner material [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2013. (in Chinese)
- [3] 杨雅婷, 龚 檬, 温庆博, 等. 煤矸石用作防渗防污材料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013,

- 35(S1):282-286.
YANG Ya-ting, GONG Meng, WEN Qing-bo, *et al.* Experimental study on coal gangue applied as anti-seepage and anti-fouling materials [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, **35**(S1): 282-286. (in Chinese)
- [4] XUE Qiang, LU Hai-jun, LI Zhen-ze, *et al.* Cracking, water permeability and deformation of compacted clay liners improved by straw fiber [J]. **Engineering Geology**, 2014, **178**:82-90.
- [5] 陈磊, 廖立兵, 张秀丽. 膨润土、沸石和赤泥用作垃圾填埋场底部矿物衬里的研究[J]. 环境工程, 2010, **28**(S1):209-213.
CHEN Lei, LIAO Li-bing, ZHANG Xiu-li. Application of bentonite, zeolite and red mud in the preparation of bottom liner for garbage landfill [J]. **Environmental Engineering**, 2010, **28**(S1):209-213. (in Chinese)
- [6] 张永利, 朱佳, 史册, 等. 高岭土的改性及其对Cr(VI)的吸附特性[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(5):561-568.
ZHANG Yong-li, ZHU Jia, SHI Ce, *et al.* Modification of kaolin and its adsorption properties on Cr(VI) [J]. **Research of Environmental Sciences**, 2013, **26**(5):561-568. (in Chinese)
- [7] 杜延军, 蒋宁俊, 王乐, 等. 水泥固化锌污染高岭土强度及微观特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11):2114-2120.
DU Yan-jun, JIANG Ning-jun, WANG Le, *et al.* Strength and microstructure characteristics of cement-based solidified/stabilized zinc-contaminated kaolin [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, **34**(11): 2114-2120. (in Chinese)
- [8] 陈蕾, 刘松玉, 杜延军, 等. 水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12):1898-1903.
CHEN Lei, LIU Song-yu, DU Yan-jun, *et al.* Unconfined compressive strength properties of cement solidified/stabilized lead-contaminated soils [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, **32**(12): 1898-1903. (in Chinese)
- [9] 中国建筑材料科学研究总院. 通用硅酸盐水泥:GB 175—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
China Building Materials Academy. Common Portland Cement: GB 175-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [10] 南京水利科学研究院. 土工试验规程:SL 237—1999 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Specification of Soil Test:SL 237-1999 [S]. Beijing:China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [11] 建设部标准定额研究所. 生活垃圾卫生填埋技术规范:CJJ 17—2004 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
Quota Standard Institute of the Ministry of Construction. Technical Code for Municipal Solid Waste Sanitary Landfill:CJJ 17-2004 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [12] 钟孝乐, 詹良通, 龚标, 等. 我国3种典型高岭土的固结、渗透及吸附特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, **48**(11):1947-1954.
ZHONG Xiao-le, ZHAN Liang-tong, GONG Biao, *et al.* Consolidation permeability and adsorption properties of three kinds of typical kaolin clays in China [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014, **48**(11): 1947-1954. (in Chinese)
- [13] Francisca F M, Glatstein D A. Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate [J]. **Applied Clay Science**, 2010, **49**(3):187-193.
- [14] Calace N, Massimiani A, Petronio B M, *et al.* Municipal landfill leachate-soil interactions:a kinetic approach [J]. **Chemosphere**, 2001, **44**(5): 1025-1031.
- [15] 李涛. 超大直径高岭土样的固结压缩试验[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(4):327-331.
LI Tao. Consolidation tests on kaolinite samples with a large diameter [J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2006, **32**(4):327-331. (in Chinese)
- [16] Amareanu M, Melita L. A comparative research study concerning the cements composition influence on the durability and physical-mechanical properties of the concretes [J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2016, **20**(3): 282-300.
- [17] An J, Wolke J G C, Jansen J A, *et al.* Influence of polymeric additives on the cohesion and mechanical

properties of calcium phosphate cements [J]. **Journal of Materials Science - Materials in Medicine**, 2016, **27**(3):58.

[18] 建设部综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021-2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)

[19] Kinuthia J M, Wild S, Jones G I. Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite [J]. **Applied Clay Science**, 1999, **14**(1-3): 27-45.

Hydraulic and deformation characteristics of kaolin solidified with cement under leachate pollution

ZHANG Qian¹, LU Hai-jun^{*1,2}, LI Ji-xiang¹, ZHANG Xiong¹

(1. Institute of Poromechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the problem of landfill liner cracking caused by high loading, the hydraulic, cracking and consolidation compression characteristics of kaolin solidified with cement are explored, and the feasibility of the solidified kaolin used as landfill liner-soil material is evaluated. The kaolin and the solidified kaolin containing 5%, 10%, 15% cement are tested in the condition of simulated cases with leachate pollution. Penetration tests are performed to evaluate hydraulic conductivity and the resistance to contaminants permeability of samples. Compression coefficient and consolidation compression characteristics of samples are analyzed by consolidation test. Moreover, through cracking tests in drying-wetting circles, cracking intensity factor and anti-cracking properties of samples are analyzed. Based on the results of tests, hydraulic conductivity of kaolin decreases by 40.4% with the increase of time, while that of the solidified kaolin containing cement decreases 16.0%-27.1%. Since kaolin used in tests belongs to medium compressible soil, void ratio of samples decreases with the increase of load, and the more the content of cement is, the smaller the decrease in void ratio of samples is. The axial displacement changes between 0.25 min and 64 min account for 65.1%-70.7% of the total at 200 kPa. The cracking area of samples reduces after adding cement, and the maximum cracking intensity factor drops by 52.6%. The difference between the solidified samples containing 10% and 15% cement is small. Whereas the strength and anti-cracking ability of kaolin are improved, the solidified kaolin containing cement can be used as landfill liner-soil material.

Key words: cement; kaolin; leachate; permeation; deformation