

改良黏土作为填埋场衬里土料的可行性研究

陆海军^{*1,2}, 栾茂田², 张金利²

(1. 武汉工业学院 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: 针对传统压实黏土衬里不能有效阻止渗滤液中重金属离子迁移的缺点, 采用颗粒活性炭、酸活化膨润土两种吸附剂改良黏土衬里以达到提高其吸附能力的目的. 通过室内平衡吸附试验, 对黏土、3%或6%颗粒活性炭改良的黏土以及3%或6%酸活化膨润土改良的黏土吸附重金属Cr(VI)的性质进行了观察. 为了评价改良黏土作为填埋场衬里土料的可靠性, 通过室内土工试验对衬里土料的体膨胀率、体缩率、渗透系数以及无侧限抗压强度等土力学参数进行了检测. 吸附试验结果表明, 经颗粒活性炭或酸活化膨润土改良的土料对Cr(VI)的吸附能力与黏土相比有了很大的提高, 这说明改良方法是有效的. 土工试验结果表明, 在重型击实的条件下, 所有衬里土料在一定含水率范围内均满足工程要求指标, 即体缩率 $\leq 4\%$ 、渗透系数 $< 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、无侧限抗压强度 $> 200 \text{ kPa}$. 因此, 改良黏土在重型击实的条件下可以作为衬里的建造材料使用.

关键词: 填埋场衬里; 吸附; 体缩率; 渗透系数; 无侧限抗压强度

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A

0 引言

垃圾填埋场衬里防渗系统是抑制填埋场污染物释放的关键屏障. 近年来, 城市生活垃圾的年增长率均在 $8\% \sim 10\%$. 卫生填埋作为一种成本较低、技术相对简单、能迅速处理垃圾的方式而成为我国主要的垃圾处理形式. 垃圾渗滤液是一种复杂的高浓度化学溶液, 垃圾分解后产生的内源水与外来水分形成的渗滤液中含有大量的重金属离子污染物. 为了阻止垃圾渗滤液对填埋场周边土壤与地下水环境的污染, 在填埋场的底部和四侧通常建有衬里系统. 《生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ 17—2004)推荐采用压实黏土衬里防渗系统, 要求其渗透系数 $< 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ^[1]. 压实黏土虽具有较低的渗透特性, 但对渗滤液中重金属离子吸附能力较差, 无法有效阻止重金属离子的迁移. 为了弥补传统压实黏土衬里防渗系统的不

足, 国内外众多学者进行了大量的尝试性研究, 其中采用吸附剂对黏土进行改良以提高其吸附能力的方法越来越受到研究者们的关注^[2]. 颗粒活性炭(GAC)和酸活化膨润土是两种比较常见的吸附材料, 对有机物、无机物均表现出强烈的吸附性^[3,4]. 另外, 作为填埋场衬里的土料必须满足低渗透性、低体膨胀率、低体缩率以及较高的抗压强度等工程特性^[5].

本研究试图采用颗粒活性炭、酸活化膨润土对压实黏土衬里防渗系统进行改性, 以达到提高衬里系统对重金属离子吸附能力的目的. 为了观察GAC、酸活化膨润土作为吸附剂改良衬里的有效性, 本研究通过室内吸附试验、土工试验对改良土料对重金属离子的吸附能力及改良土料的体膨胀率、体缩率、渗透系数及无侧限抗压强度进行一系列的试验研究.

1 试验材料与方 法

1.1 试验材料

试验中的黏土材料为取自大连市的红黏土. 将 5 g 干燥黏土与 25 mL 去离子水混合, 连续搅拌 24 h, 取泥水混合物用离心机以 $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取其上清液, 采用分光光度计未检测出 $\text{Cr}(\text{VI})$, 因此, 认为所取黏土未受到 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的污染.

为提高传统压实黏土衬里系统对重金属离子的吸附能力, 采用酸活化的钙基膨润土、活性炭作为吸附剂对压实黏土进行改性处理. 活性炭的平均粒径为 $1.25\sim2.50\text{ mm}$, 钙基膨润土的粒径 $<0.16\text{ mm}$. 黏土、GAC、酸活化膨润土的比表面积分别为 23.5 、 814.7 、 $275.8\text{ m}^2/\text{g}$. 黏土和膨润土的化学成分如表 1 所示. 采用湿法工艺对膨润土进行酸活化, 酸活化膨润土烘干粉碎后备用^[6]. 研究中采用的衬里土料分别为未处理的天然黏土、基于酸活化膨润土改良的衬里材料(97%黏土、3%活化膨润土, 94%黏土、6%活化膨润土)、基于颗粒活性炭改良的衬里材料(97%黏土、3%活性炭, 94%黏土、6%活性炭). 衬里土料的轻型与重型击实曲线如图 1 所示, 其横纵坐标分别为含水率 w 、干密度 ρ_d .

表 1 黏土与膨润土的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of clay and bentonite

土样	$w/\%$						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
黏土	60.69	23.80	0.30	0.23	0.08	4.03	2.03
膨润土	61.20	18.40	7.40	2.50	2.40	1.70	0.50

1.2 试验方法

1.2.1 平衡吸附试验 填埋场渗滤液中含 $\text{Cr}(\text{VI})$, 且此种重金属离子有剧毒, 故选择 $\text{Cr}(\text{VI})$ 作为吸附目标. 试验中 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的溶液为重铬酸钾的水溶液. 整个吸附试验在一个振动的水浴中进行. 在 100 mL 锥形瓶中, 将 2 g 土壤样本和 25 mL 分别含不同浓度 ($20\sim300\text{ mg/L}$) 的 $\text{Cr}(\text{VI})$ 溶液混合. 在 295 K 和中性 pH 条件下, 对

重金属进行吸附. 在整个吸附试验过程中, 每隔 0.5 h 标定一次溶液的 pH, 使之保持在中性条件下. 当达到吸附平衡后, 采用离心机对混合溶液进行离心处理, 根据 GB 7467—87 DPC 分光光度法采用分光光度计检测上清液中 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的浓度. 根据质量平衡, 土壤对重金属的吸附量可以通过下式计算:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

(1)

式中: q_e 为土壤对重金属离子的吸附量 (mg/kg); C_0 为重金属离子的初始浓度 (mg/L); C_e 为重金属离子液相平衡浓度 (mg/L); V 为溶液体积 (mL); m 为土壤固体质量 (g).

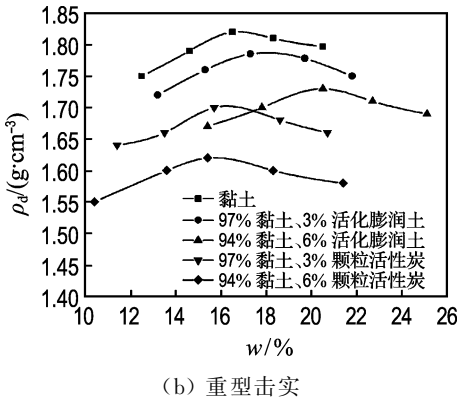
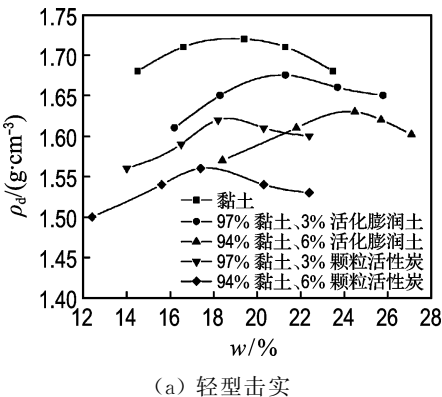


图 1 填埋厂衬里土料的轻型与重型击实曲线

Fig. 1 Light and modified compaction curves of landfill liner-soil materials

1.2.2 土工试验 根据土工试验规程 SL 237—025—1999 和 SL 237—026—1999 中的规定, 采用膨胀仪和收缩仪对不同衬里土料的体膨胀率和体缩率进行了检测, 土样为直径 6.18 cm、高 2 cm

的圆柱体；根据土工试验规程 SL 237-014—1999,采用南 55 型渗透仪对衬里土料的渗透系数进行了检测,土样为直径 6.18 cm、高 4 cm 的圆柱体；根据土工试验规程 SL 237-020—1999,采用应变控制式无侧限压缩仪对衬里土料的无侧限抗压强度进行了检测,土样为直径 3.91 cm、高 8 cm 的圆柱体。

试样的制备过程如下:根据衬里土料的轻型、重型击实曲线,将烘干后的衬里土料与一定量的水搅拌均匀后,采用压实的方法制成试样。

2 试验结果与讨论

2.1 改良衬里土料对重金属离子的吸附

衬里土料对 Cr(VI)的吸附特性如图 2 所示。由图可以发现,衬里土料对 Cr(VI)的吸附符合 Langmuir 吸附模式,其表达式为

Cs = (Qm * b * Ce) / (1 + b * Ce) (2)

式中:C_s 为平衡吸附量(mg/kg);b、Q_m 为等温吸附参数。

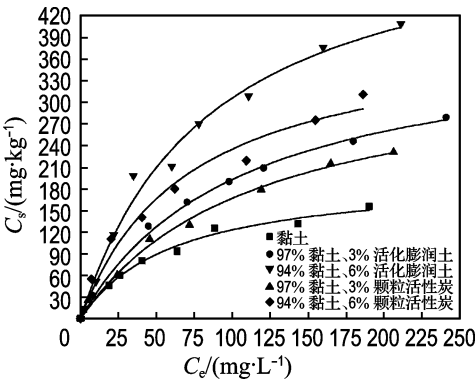


图 2 衬里土料对 Cr(VI)的吸附等温线
Fig. 2 Adsorption isotherms for Cr(VI) with liner-soil materials

从图 2 可以得出,在 C_e = 100 mg/L 时,黏土、含 3%酸活化膨润土的黏土、含 3%颗粒活性炭的黏土、含 6%酸活化膨润土的黏土、含 6%颗粒活性炭的黏土,对 Cr(VI)的平衡吸附量分别为 123.04、195.17、168.20、306.35 和 236.04 mg/kg,说明酸活化膨润土、颗粒活性炭改性的黏土

对 Cr(VI)的吸附能力有了显著的提高。衬里土料对 Cr(VI)的吸附能力由强到弱依次为添加酸活化膨润土的黏土、添加颗粒活性炭的黏土、黏土。通过以上分析可以得出,采用酸活化膨润土、颗粒活性炭改良压实黏土衬里以提高其吸附能力的方法是可行的。

2.2 改良衬里土料的体膨胀率

在干旱与半干旱地区,高膨胀性的黏土容易干燥开裂。为了保证垃圾填埋场的安全运营,衬里土料应具有较低的膨胀性,以保证压实黏土衬里系统的完好性。衬里土料的含水率与体膨胀率 α_v 之间的变化关系如图 3 所示。

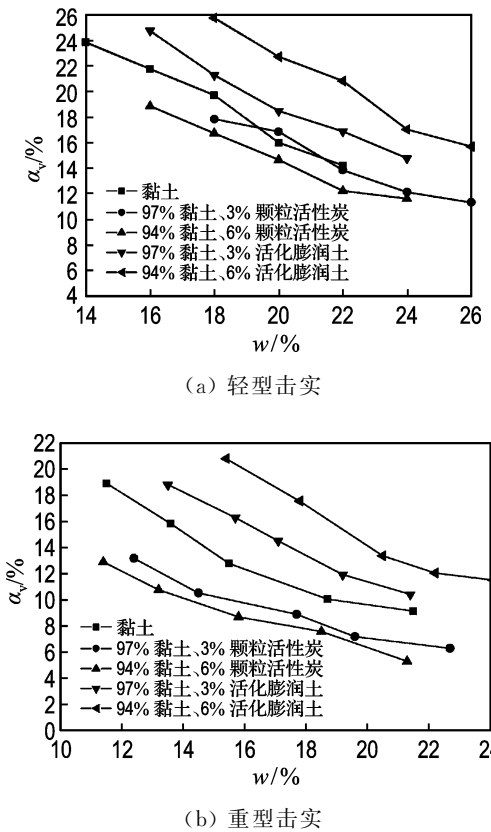


图 3 衬里土料的含水率与体膨胀率之间的关系
Fig. 3 Volumetric swelling versus moulding water content of liner-soil materials

由图 3 可以看出,衬里土料的体膨胀率随含水率的增加而逐渐减小。轻型击实的条件下,天然黏土的最小体膨胀率为 14.24%;含 3%、6%颗粒

活性炭的黏土,最小体膨胀率分别减小至 11.34%和 11.64%;含 3%、6%酸活化膨润土的黏土,最小体膨胀率分别增大至 14.8%和 15.7%.在重型击实的条件下,天然黏土、含 3%或 6%颗粒活性炭的黏土、含 3%或 6%活化膨润土的黏土,其体膨胀率显著下降,分别减小至 9.12%、6.27%、5.28%、10.40%和 11.50%.这可能是由于酸活化膨润土有较大的膨胀性,而颗粒活性炭不具有膨胀性,导致改良压实黏土的膨胀性表现出了完全不同的变化规律.

2.3 改良衬里土料的体缩率

Daniel 等认为^[7,8],衬里土料的体缩率 δ_v 不应超过 4%.衬里土料的含水率与体缩率之间的变化关系如图 4 所示.

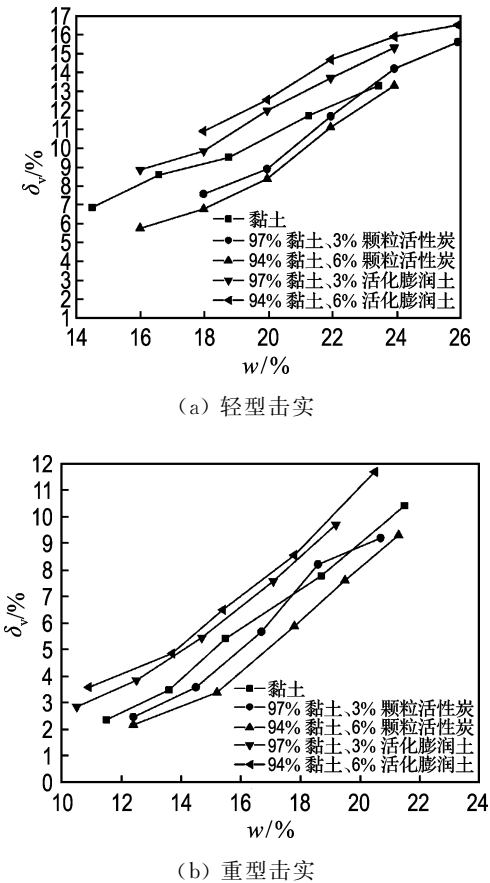


图 4 衬里土料的含水率与体缩率之间的关系
Fig. 4 Volumetric shrinkage versus moulding water content of liner-soil materials

由图 4 可以看出,衬里土料的体缩率随含水

率的增加而逐渐增大.在轻型击实的条件下,黏土以及经颗粒活性炭或活化膨润土改良的黏土,其体缩率均超过了 4%.在重型击实的条件下,改良土料在较低含水率时,其体缩率能达到小于 4%的要求,这与 Taha 等的试验结果相似^[5].以上分析说明采用比较大的击实功,土壤的体缩率会出现较大幅度的下降.

2.4 改良衬里土料的渗透系数

渗透系数 k 是垃圾填埋场衬里设计的一个重要参数.衬里土料的含水率与渗透系数之间的变化关系如图 5 所示.

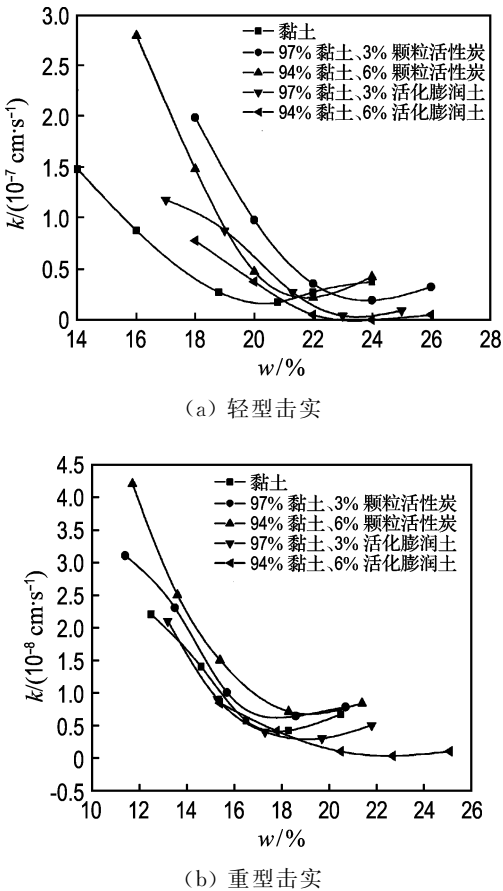


图 5 衬里土料的含水率与渗透系数之间的关系

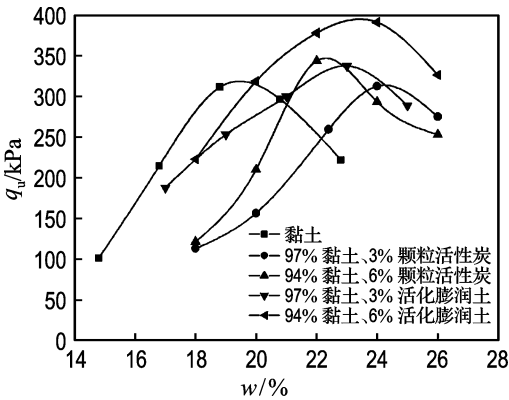
Fig. 5 Hydraulic conductivity versus moulding water content of liner-soil materials

由图 5 可以看出,改良土料的渗透系数在一定含水率条件下均能满足小于 1×10^{-7} cm/s 的工程要求,且渗透系数随击实功的增大急剧下降.

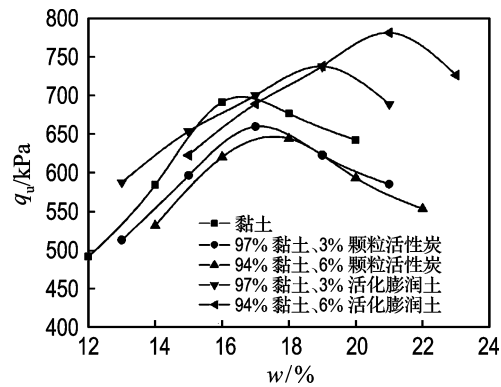
当衬里土料的含水率低于最优含水率时,渗透系数有相对比较大的值;当压实土料的含水率稍高于最优含水率时,渗透系数有比较小的值;当含水率超过最优含水率 2% 左右,土料的渗透系数达到最小值,这可能是由于土的微观结构发生了变化,当含水率超过最优含水率 2% 左右时,土颗粒的结构更趋向于水平定向性,从而导致竖向渗透系数的降低。

2.5 改良衬里土料的无侧限抗压强度

为保证衬里能承受上覆垃圾重量而不被破坏,要求衬里土料应有足够大的承载能力. Daniel 等^[7]认为,衬里土料的无侧限抗压强度 q_u 最小值应为 200 kPa. 衬里土料的含水率与无侧限抗压强度之间的变化关系如图 6 所示。



(a) 轻型击实



(b) 重型击实

图 6 衬里土料的含水率与无侧限抗压强度之间的关系

Fig. 6 Unconfined compressive strength versus moulding water content of liner-soil materials

由图 6 可以看出,衬里土料的无侧限抗压强度随含水率的增加先增大后减小,一些研究者在试验中也观察到了与本研究类似的结果^[9]. 出现此种现象的原因是当含水率较低时,土颗粒表面水膜很薄,相对移动困难,压实度较差,无侧限抗压强度较低;随着含水率的增加,水膜之间润滑作用逐渐突出,压实度增加,无侧限抗压强度增大;但当含水率增加到一定程度之后,水膜润滑作用不再明显增加,且土颗粒之间的封闭气泡难以排出,引起无侧限抗压强度下降. 由图 6 还可以观察到,改良土料在一定的含水率条件下,其无侧限抗压强度均能达到 200 kPa 以上,且抗压强度随着击实功的增加出现了明显的增高趋势。

3 结 论

(1)经酸活化膨润土、颗粒活性炭两种吸附剂改良的黏土对重金属离子的吸附能力相对于黏土有了很大的提高,说明采用这两种吸附剂改良的衬里对延迟重金属离子污染物的迁移是有效的。

(2)在一定的含水率及重型击实的条件下,改良土料能满足体缩率不超过 4%、渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s、无侧限抗压强度大于 200 kPa 的工程要求,说明这些土料可以作为填埋场衬里的建筑材料使用。

(3)当土料的压实含水率稍高于最优含水率时,土料的渗透系数及抗压强度表现出了较好的工程要求,即较低的渗透系数和较高的抗压强度。

(4)随击实功的增大,土料的体膨胀率、体缩率及渗透系数明显减小,抗压强度显著增大。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. CJJ 17—2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004

[2] LO I M C, MAK R K M, LEE S C H. Modified clays for waste containment and pollutant attenuation [J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1997, 123(1):25-32

[3] LU Hai-jun, LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li, et al.

Study on the adsorption of Cr(VI) onto landfill liners containing granular activated carbon or bentonite activated by acid [J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, **18**:125-130

[4] BARTELT-HUNT S L, SMITH J A, BURNS S E, *et al.* Evaluation of granular activated carbon, shale, and two organoclays for use as sorptive amendments in clay landfill liners [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2005, **131**(7): 848-856

[5] TAHA M R, KABIR M H. Tropical residual soil as compacted soil liners [J]. **Environmental Geology**, 2005, **47**:375-381

[6] 胡恭任,于瑞莲. 酸改性膨润土处理含铅废水[J]. 中国矿业, 2007, **16**(2):100-102

[7] DANIEL D E, WU Y K. Compacted clay liners and covers for arid sites [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, **119**(2):223-237

[8] TAY Y Y, STEWART D I, COUSENS T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners [J]. **Engineering Geology**, 2001, **60**: 263-274

[9] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4**(3):54-58

Feasibility study using improved clay as landfill liner-soil materials

LU Hai-jun^{*1,2}, LUAN Mao-tian², ZHANG Jin-li²

(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 prevent effectively the transport of heavy metal ions in landfill leachate, adding materials, granular activated carbon (GAC) and acid-activated bentonite capable of strongly adsorbing pollutants to the conventional compacted clay liner is one method that has been tried. The adsorption of Cr(VI) to clay, clay containing 3% or 6% GAC and 3% or 6% acid-activated bentonite were investigated by laboratory batch tests. In order to evaluate the feasibility of improved clay used as liner-soil materials, geotechnical properties, including volumetric swelling, volumetric shrinkage, hydraulic conductivity and unconfined compressive strength, were measured in laboratory geotechnical tests. The results of batch tests indicate that the Cr(VI) sorption to clay containing GAC and acid-activated bentonite is much greater than Cr(VI) sorption to natural clay. GAC and acid-activated bentonite are two potential materials for use as sorptive amendments for trapping heavy metals in clay landfill liners. The results of geotechnical tests show that the clay containing GAC or acid-activated bentonite exhibits $\leq 4\%$ of volumetric shrinkage, $< 1 \times 10^{-7}$ cm/s of hydraulic conductivity and > 200 kPa of unconfined compressive strength in some scope of water content at modified compaction. These findings suggest that the clay containing GAC or acid-activated bentonite can be potentially utilized as compacted liner-soil materials.

Key words: landfill liner; adsorption; volumetric shrinkage; hydraulic conductivity; unconfined compressive strength