

DOI: 10.11779/CJGE201706022

Ca^{2+} 浓度对膨润土掺砂混合土渗透性能的影响

许四法, 吴雪辉, 胡 琦, 张 勇, 王 哲*

(浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310032)

摘 要: 垃圾填埋场底部铺设含黏土或膨润土掺砂混合土的防渗系统, 防止渗滤液流入地下污染周边环境。采用模型试验研究 Ca^{2+} 离子浓度和基础局部沉降对膨润土掺砂混合土渗透特性的影响。试验结果表明 Ca^{2+} 浓度对膨润土掺砂混合土的渗透性能有较大影响, 渗透液中 Ca^{2+} 浓度超过一定值后混合土渗漏; Ca^{2+} 离子浓度与发生渗透时间之间有很大关系, 浓度越高发生渗透的时间越短; 同样沉降量条件下, 含 Ca^{2+} 离子溶液渗透的混合土均发生渗漏, 而用蒸馏水作渗透液的没有出现渗漏; 钠基膨润土遇 Ca^{2+} 离子溶液后, 当 Ca^{2+} 离子浓度大于两倍 Na^+ 就会发生离子交换, 钠基膨润土转化为钙基膨润土, 混合土的防渗性能下降。因此开展 Ca^{2+} 离子浓度对膨润土掺砂混合土渗透特性的研究具有较好的理论和实际意义。

关键词: 膨润土掺砂混合土; 局部沉降; Ca^{2+} 离子浓度; 渗透量; 离子交换

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)06 - 1145 - 06

作者简介: 许四法 (1967 -), 男, 博士, 教授, 主要从事基础工程和环境岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: xusifa@zjut.edu.cn。

Influence of Ca^{2+} concentration on hydraulic properties of bentonite-sand mixtures

XU Si-fa, WU Xue-hui, HU Qi, ZHANG Yong, WANG Zhe

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A liner system containing clay or bentonite-sand mixtures is installed on the bottom of a landfill to prevent contaminants from flowing into the surrounding ground. The influence of Ca^{2+} concentration and local settlement on hydraulic properties of bentonite-sand mixtures is studied by model tests. It is shown that Ca^{2+} concentration has significant influence on the hydraulic properties, while the bentonite-sand mixtures leak with Ca^{2+} concentration more than 3.00g/L. Ca^{2+} concentration correlates with seepage time, which is shortened with the increase of Ca^{2+} concentration. Under the same settlement conditions, leakage occurs to the bentonite-sand mixtures infiltrated by Ca^{2+} ion solution but not to those by distilled water solution. When Ca^{2+} concentration is higher than two times Na^+ in solution, the sodium bentonite converts to calcium bentonite, and the hydraulic properties of the bentonite-sand mixtures decrease. Therefore, it is of theoretical and practical values to investigate the influence of Ca^{2+} concentration and local settlement on hydraulic properties of the bentonite-sand mixtures..

Key words: bentonite-sand mixture; local settlement; Ca^{2+} concentration; seepage quantity; ion exchange

0 引 言

截至 2014 年, 中国有生活垃圾焚烧发电厂近 300 座, 处理能力 1.89×10^5 t/d, 按照焚烧后底灰和飞灰为垃圾重量的 20% 计算, 每天产生的焚烧灰渣近 3.8 万 t。除少量灰渣作为资源被再利用如制砖、骨料和筑路之外^[1-2], 大部分被运到垃圾填埋场回填。由于灰渣中含有 Cu, Cr, Ni, Pb 和 Zn 等重金属^[3], 为了防止有害渗滤液流入地下污染周边环境, 垃圾填埋场底部设置以土工膜、黏土或膨润土掺砂混合土为主的防渗材料, 但在天然黏土缺乏地区, 一般采用膨润土掺砂混合土代替天然黏土^[4]。如果“喀斯特”地貌地区基础没有处理好或地下水收集系统处填压不密实, 会

导致混合土产生局部变形, 影响防渗性能。

膨润土遇水膨胀, 充填颗粒之间的孔隙, 堵塞渗水通道。由于钠基膨润土的膨胀特性优于钙基膨润土, 因此混合土中的膨润土一般为钠型。胡畔^[5]采用自行研制的膨胀仪分析了膨胀力随时间变化规律、两向膨胀力之间的关系和膨胀应变与时间及吸水量之间的关系。Villar 等^[6]和 Agus 等^[7]试验研究了干密度和含水率对膨润土膨胀力的影响。Lee 等^[8]测定了钙基膨润土的轴向和径向膨胀力。朱赞成等^[9]认为膨润土及掺

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY15E080021, Y14E080049)

收稿日期: 2016 - 03 - 03

*通讯作者 (E-mail: wangzsd@163.com)

砂混合物的膨胀应变主要取决于膨润土及掺砂混合物的最初干密度和膨润土含量,随着初始干密度的增加而增加,随初始含水率的增加膨胀变形逐渐减小。孙文静等^[10]研究了膨润土与砂混合土中掺砂率的高低对混合土膨胀特性的影响。李培勇等^[11]对不同干密度的膨润土加砂混合物的膨胀特性进行了研究,建立了膨胀应变、轴向应力、膨胀应变之间的关系。Saba 等^[12]和 Kawaragi 等^[13]分析了膨润土掺砂混合土的微观结构,认为砂颗粒不是孤立地存在于混合土中,而是连续分布在晶体之间的孔隙中。Quina 等^[14]的研究表明垃圾填埋场渗滤液中 pH 值达到 12.5,甚至超过饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液的碱性。Ye 等^[15]认为随 pH 的增大膨胀压力减小,减小的程度取决于温度。Sun 等^[16]进行了盐溶液饱和和高庙子膨润土的膨胀力评价与预测研究,试验结果表明随着浓度的增加膨润土的膨胀特性下降。徐超等^[17]认为膨润土的自由膨胀量随着阳离子离子价和浓度的增大而逐渐减小,而渗透系数则逐渐增大。

综上所述,目前有关膨润土掺砂混合土的膨胀特性的研究,主要侧重于膨润土材料膨胀力的大小。但由于灰渣中除含有各种重金属之外,还有大量的碱和碱土金属氧化物(Na, K, Ca 和 Mg)^[18], CaO 含量高^[19],渗滤液中 Ca^{2+} 的浓度约 2000~5000 mg/L,渗滤液一旦流入钠基膨润土掺砂混合土中,对混合土的渗透性能产生较大影响。本文采用模型试验,研究 Ca^{2+} 浓度对钠基膨润土掺砂混合土渗透性能的影响。

1 试验材料

1.1 试验材料

配制混合土用砂土最大颗粒小于 5 mm,最大干密度 1.65 g/cm^3 。砂土的粒径分布见图 1 所示。

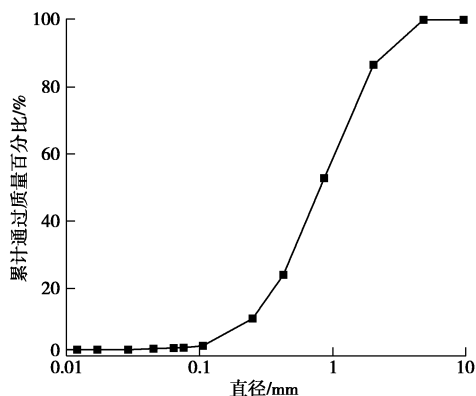


图 1 土的颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution of sandy soil

膨润土为钠基膨润土,蒙脱石含量为 78.2%,土颗粒相对密度为 2.76,膨胀量为 17 mL/g,总阳离子

交换量为 0.77 meq/g,其中 Na^+ 为 0.41 meq/g, Ca^{2+} 为 0.28 meq/g。

膨润土的掺量为干砂的 10%,目标含水率为 17.4%,混合后的最大干密度为 1.67 g/cm^3 ,渗透系数为 $4.5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$,如图 2 所示。

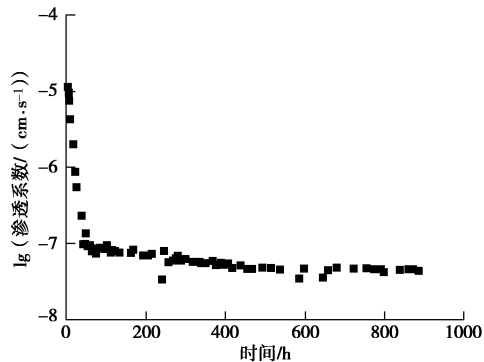


图 2 膨润土掺砂混合土渗透特性

Fig. 2 Permeability characteristics of bentonite-sand mixtures

1.2 Ca^{2+} 溶液配制方法

采用 CaCl_2 配制 Ca^{2+} 溶液, Ca^{2+} 的浓度按照下式计算:

$$\text{Ca}^{2+} \text{ 浓度}(\text{g/L}) = \frac{\text{CaCl}_2 \times 40}{111 \times \text{蒸馏水体积}} \quad (1)$$

试验时根据 Ca^{2+} 目标浓度,由式(1)计算 1 L 蒸馏水所需 CaCl_2 的量,加入充分搅拌直至完全溶解。

2 小型试样渗透试验结果与分析

2.1 试验装置和方法

膨润土的掺量为干砂的 10%,实测含水率为 16.43%~17.33%。膨润土掺砂混合土搅拌均匀后,装入长、宽和高为 20, 10, 8 cm 的铁制容器中,压实度大于 95%。铁制容器上部再连接塑料制容器,连接处密封防止渗漏,以便装入渗透溶液。试验简易装置如图 3 所示,离试样下部 5 cm 处设置渗漏液收集容器,收集容器放置在电子秤上,随时计测渗漏液的重量。

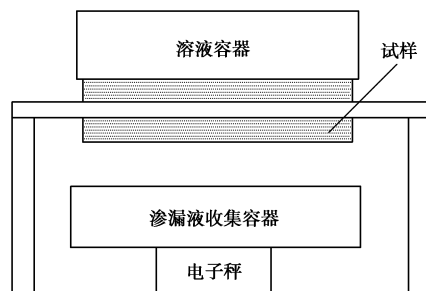


图 3 试验简易装置

Fig. 3 Simple test device

试验时将配制好的 Ca^{2+} 溶液 200 mL 倒入试样上部的容器中,10 min 后再倒入 200 mL Ca^{2+} 溶液,60

min 后再添加 200 mL Ca^{2+} 溶液。试验开始后, 每分钟计测试样下部收集水容器中渗漏液的重量, 观测试样的状态变化。

2.2 试验方案

试验方案如表 1 所示。为了分析不同 Ca^{2+} 浓度对膨润土掺砂混合土渗透性能的影响, 试验共有 7 种 Ca^{2+} 浓度, 分别是 0.00, 1.00, 2.00, 3.00, 3.50, 4.00, 5.00 g/L。

表 1 试验方案
Table 1 Test cases

方案	Ca^{2+} 浓度 /(g·L ⁻¹)	CaCl_2 浓度 /(g·L ⁻¹)	混合土含水率 /%
1	0.00	0.00	16.95
2	1.00	2.78	16.58
3	2.00	5.55	16.43
4	3.00	8.33	17.33
5	3.50	9.71	16.94
6	4.00	11.10	16.77
7	5.00	13.88	16.84

2.3 试验结果及分析

(1) 试验时间与渗透量

图 4 为 Ca^{2+} 浓度与发生渗透时间的关系。从图 4 可知, Ca^{2+} 浓度为 3.00, 3.50, 4.00, 5.00 g/L 时分别在试验开始后 90, 14, 7, 6 min 发生渗透, Ca^{2+} 浓度为 0.00, 1.00, 2.00 g/L 时 90 min 内未发生渗透现象, 但浓度为 1.00 和 2.00 g/L 的条件下在 72 h, 18 h 开始渗透, 而未含 Ca^{2+} 离子的混合土始终未被击穿。浓度 1.00 g/L 与 3.00, 3.50, 4.00, 5.00 g/L 相比, 击穿时间分别延长了 48 倍, 308 倍, 617 倍, 720 倍。对 Ca^{2+} 离子浓度与击穿时间的关系曲线进行拟合, 得

击穿时间 = $6 + \frac{4314}{1 + 10^{1.25x - 1.982}}$, (2)

式中, x 为溶液中离子浓度。表明 Ca^{2+} 离子浓度与发生渗透时间之间成指数关系, 浓度越高发生渗透的时间越短。

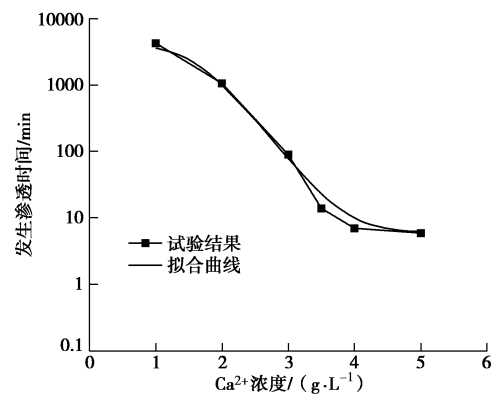


图 4 Ca^{2+} 离子浓度与发生渗透时间

Fig. 4 Ca^{2+} concentration and the beginning of seepage time
渗透时间与渗透量的关系如图 5 所示。由图 5 可

知 Ca^{2+} 离子浓度为 0.00, 1.00, 2.00 g/L 的条件下, 从渗透试验开始到试验结束 100 min 内, 没有发生渗漏, 但浓度超过 3.00 g/L 后, 浓度越高渗透量越多, 如试验开始 30 min 后 Ca^{2+} 离子浓度为 3.50, 4.00, 5.00 g/L 的渗透量分别为 10.89, 41.43, 75.53 cm^3 , 60 min 后的渗透量为 41.58, 172.65, 201.14 cm^3 。另外, 同一种浓度下渗透量与试验时间几乎成线性关系。

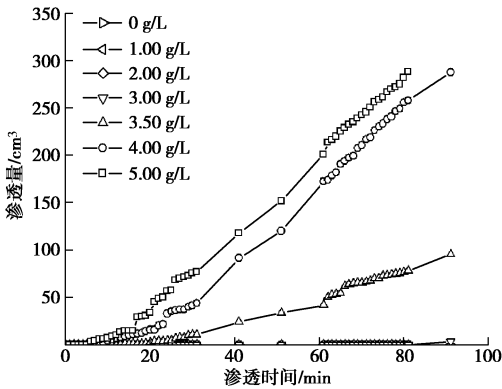


图 5 渗透时间与渗透量

Fig. 5 Relationship between seepage time and seepage quantity

(2) 渗漏液中 Ca^{2+} 浓度

试验结束后对渗漏液收集容器中的溶液进行 Ca^{2+} 离子含量分析, 浓度为 3.00, 3.50, 4.00, 5.00 g/L 的溶液透过混合土后 Ca^{2+} 离子的含量分别为 1.27, 1.36, 1.52, 1.60 g/L, 与渗透前的 Ca^{2+} 离子浓度相比明显减小, 分别降低了 1.73, 2.14, 2.48, 3.40 g/L, 浓度减小的原因可能是被混合土吸附或与 Na^+ 离子进行了交换。

2.4 结果分析与讨论

膨润土的主要成分为蒙脱石, 蒙脱石由两层硅氧四面体晶片中间夹一层铝镁氧八面体晶片, 构成 3 层型晶胞, 即 2:1 型晶胞, 如图 6 所示。晶胞间通过 O^{2-} 与 O^{2-} 联结, 没有氢键故键力很弱, 水分子很容易进入晶层之间, 从而改变晶胞之间距离, 表现出吸水膨胀性能, 通常可以吸收 8~15 倍于自身体积的水量。

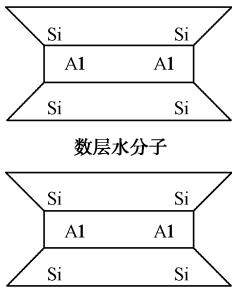


图 6 蒙脱石晶格结构

Fig. 6 Structure of crystal cell of montmorillonite
膨润土因其特殊的层状结构和极强的阳离子交换

性,能和溶液中的阳离子发生等物质的量交换,因此当混合土中的钠基膨润土遇到 Ca^{2+} 离子溶液后,只要溶液中的 Ca^{2+} 离子浓度达到一定程度,在膨润土-水系统中会发生如下离子交换:



交换是一种平衡反应, Ca^{2+} 离子浓度大于两倍 Na^{+} 就会发生离子交换。随着溶液中 Ca^{2+} 离子浓度增加,混合土的膨胀性能降低,渗透性增大。

3 局部沉降条件下渗透试验

3.1 试验装置和方法

(1) 试验装置

试验装置如图 7 所示。在长 800 mm, 宽 200 mm 的模型箱内铺设了一层膨润土加砂混合土,混合土上面预埋了水管,观察受局部沉降后混合土的渗透性能变化。中间 400 mm 为沉降区域,由千斤顶控制,两侧设置了位移计。模型箱侧板为有机玻璃,混合土侧面做了白色标记点,由数码摄像机拍摄后分析裂缝发展和变形。

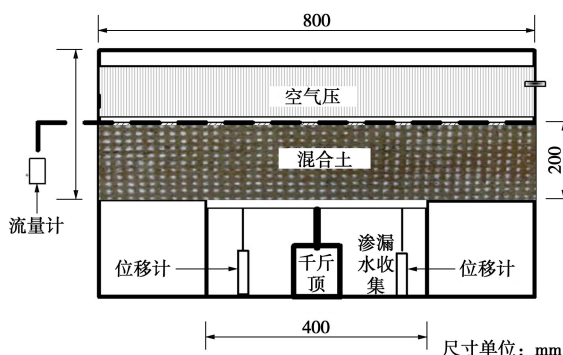


图 7 试验装置

Fig. 7 Sketch of devices

(2) 试验方案和方法

膨润土掺砂混合土按照先前的配制分 3 层装入模型箱,压实度大于 95%。试验共 4 个方案, Ca^{2+} 浓度分别为 0.00, 0.50, 2.00, 5.00 g/L。渗透分为 3 个阶段:第一阶段注入含 Ca^{2+} 溶液 3L,观察混合土是否渗透;24 h 后进入第二阶段,通过管路系统注入蒸馏水,观测混合土的渗透量。24 h 后进入第三阶段试验,千斤顶以 0.5 mm/min 的速度下降,沉降同时继续蒸馏水渗透试验直至沉降量 30 mm。整个试验过程中测量渗透量、渗透后溶液中的 Ca^{2+} 浓度、基础局部沉降量和裂缝的开展。

3.2 试验结果和分析

第一阶段试验时间与渗透量见图 8 所示。从试验结果可知,试验开始 1000 min 以内, Ca^{2+} 浓度为 5.00 g/L 时在 8 min 发生渗透,60 min 渗透量为 434.14 cm^3 ,

1000 min 时的渗透量达到 1656.86 cm^3 。其他 3 种 Ca^{2+} 浓度均未发生渗透现象,这与小型试样的试验结果相类似。

Ca^{2+} 溶液渗透 24 h 后进入第二阶段,改为蒸馏水,试验结果如图 9 所示。试验情况与 Ca^{2+} 溶液渗透结果相似,除第一阶段 Ca^{2+} 浓度 5.00 g/L 的继续渗漏以及渗透量增大之外,其他 3 组试验中均未发现渗漏现象。

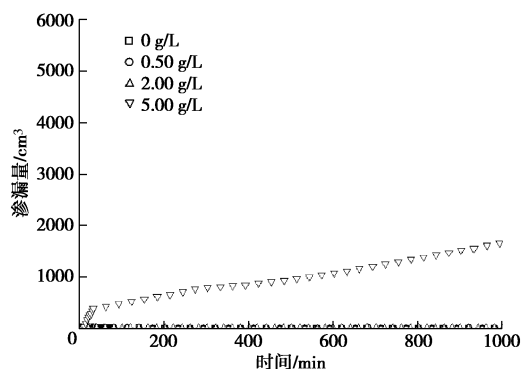


图 8 渗透时间与渗透量

Fig. 8 Relationship between seepage time and seepage quantity

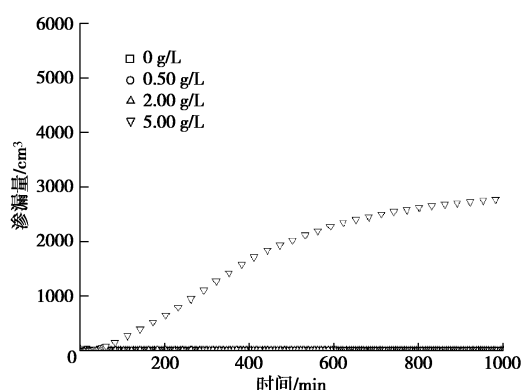


图 9 渗透时间与渗透量

Fig. 9 Relationship between seepage time and seepage quantity

第二阶段结束后,进入第三阶段试验,模拟基础局部沉降条件下膨润土掺砂混合土的渗透性能,基础局部沉降量与裂缝开展高度之间的关系如图 10 所示。从图可知,基础沉降量 4.0 mm 时,4 种 Ca^{2+} 浓度浸透过的混合土层中均出现初始裂缝。沉降量继续增大,裂缝向上发展,基础沉降量达到 30 mm 后,始终未被 Ca^{2+} 浸透过的混合土中裂缝开展高度占土层厚度的 70%左右,被 Ca^{2+} 浓度 0.50, 2.00 g/L 浸透过的混合土中裂缝开展高度占土层厚度的 80%和 90%,被 Ca^{2+} 浓度 5.00 g/L 浸透过的混合土中出现贯通裂缝。

沉降量与渗透之间的关系见表 2 所示。基础局部沉降量为 4.5 mm 时,被 Ca^{2+} 浓度 0, 0.50, 2.00, 5.00 g/L 浸透过的混合土中裂缝宽度为 5.5, 2.0, 4.0, 5.0 mm, 2.00, 5.00 g/L 浸透过的混合土的总渗透量为 17,

56 cm³。沉降量继续增大, 裂缝占混合土层厚度的比例不断提高, 裂缝变宽, 渗透量增大, 沉降量 30 mm 时 (60 min) 0.50, 2.00, 5.00 g/L 浸透过的混合土中渗透量达到 93.98, 121.11, 559.26 cm³, 而未被 Ca^{2+} 渗透过的混合土未见渗漏现象。试验结果表明 Ca^{2+} 离子浓度对膨润土掺砂混合土的渗透性能有很大影响, 这主要是由于 Ca^{2+} 离子被土颗粒吸附以及发生了 Ca^{2+} 与 Na^+ 交换, 钠基膨润土转化为钙基膨润土, 膨胀性能下降导致渗漏量增加。

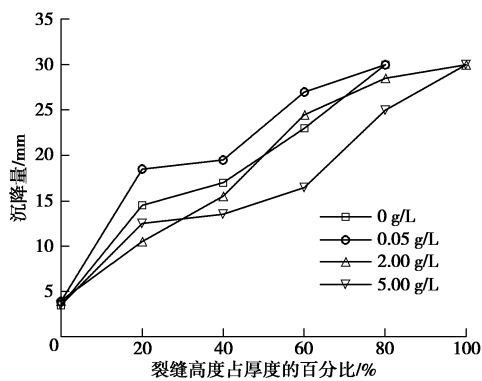


图 10 沉降量与开裂高度

Fig. 10 Local settlements and crack heights

表 2 基础沉降量与渗透

Table 2 Local settlements and seepage quantities

基础沉 降量/mm	渗透与开裂	Ca^{2+} 浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			
		0	0.2	2.0	5.0
0	渗透量/ cm^3	0	0	0	渗漏
	裂缝宽度/mm	0	0	0	0
4.5	渗透量/ cm^3	0	0	17	56
	裂缝宽度/mm	5.5	2	4	5
3.0	渗透量/ cm^3	0	94	121	559
	裂缝宽度/mm	10	9	13	15

4 结 论

采用小型渗透和局部沉降装置对膨润土掺砂混合土在 Ca^{2+} 浓度浸透和基础局部沉降后的渗透特性进行了试验研究。试验结果表明, 基础局部沉降量和渗透液中 Ca^{2+} 浓度对膨润土掺砂混合土的渗透性能有较大影响。得到以下 3 点结论。

(1) Ca^{2+} 离子浓度与混合土发生渗透时间之间有很大关系, 浓度越高发生渗透的时间越短。工程设计时, 垃圾或焚烧灰渣渗滤液中含有较高 Ca^{2+} 离子浓度时填埋场底部应慎用膨润土类防渗材料。

(2) 膨润土因其 3 层层状结构和极强的阳离子交换性, 能和溶液中的阳离子发生等物质的量交换, 在膨润土-水系统中会发生离子交换, 钠基膨润土转化为

钙基膨润土, 造成渗透性能下降。

(3) 同样沉降量条件下, 第一阶段 Ca^{2+} 离子溶液浸透过的混合土均发生渗漏, 3 个阶段渗透液中均未含 Ca^{2+} 离子的混合土中未出现渗漏现象。

参考文献:

[1] 常 威, 蒋旭光, 邱琪丽, 等. 全烧垃圾流化床炉飞灰制备免烧砖的性能研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(7): 2224 - 2232. (CHANG Wei, JIANG Xu-guang, QIU Qi-li, et al. Performance of non-fired brick making from fly ash in a purely burning municipal solid waste circulating fluidized bed incinerator[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(7): 2224 - 2232. (in Chinese))

[2] DEL VALLE-ZERMENO R, FORMOSA J, PRIETO M, et al. Pilot-scale road subbase made with granular material formulated with MSWI bottom ash and stabilized APC fly ash: environmental impact assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **266**: 132 - 140.

[3] LI X D, REN Y, JI S S, et al. Emission characteristics of hazardous components in municipal solid waste incinerator residual ash[J]. Journal of Zhejiang University (Applied Physics & Engineering), 2015, **16**(7): 596 - 596.

[4] CJJ 113—2007 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范[S]. 2007. (CJJ 113—2007 Technical code for liner system of municipal solid waste landfill[S]. 2007. (in Chinese))

[5] 胡 畔, 杨 庆. 膨润土加砂混合物膨胀特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 453 - 458. (HU Pan, YANG Qing. Experimental study of swelling characteristics of bentonite-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 453 - 458. (in Chinese))

[6] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2008, **39**(1/2): 38 - 49.

[7] AGUS S S, SCHANZ T. A method for predicting swelling pressure of compacted bentonites[J]. Acta Geotechnica, 2008, **3**(2): 125 - 137.

[8] LEE J O, LIM J G, KANG I M, et al. Swelling pressures of compacted Ca-bentonite[J]. Engineering Geology, 2012, **129**: 20 - 26.

[9] 朱赞成, 尹洪滨, 沈一军, 等. 膨润土及掺砂混合物膨胀变形试验研究[J]. 贵州大学学报, 2014, **31**(3): 86 - 89. (ZHU Zan-cheng, YIN Hong-bin, SHEN Yi-jun, et al. Experimental study of swelling characteristics of backfill mixture[J]. Journal of Guizhou University, 2014, **31**(3): 86 - 89. (in

- Chinese))
- [10] 孙文静, 刘仕卿, 孙德安, 等. 高掺砂率膨润土混合土膨胀特性及其膨胀量预测[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1620 - 1626. (SUN Wen-jing, LIU Shi-qing, SUN De-an, et al. Swelling characteristics of bentonite-sand mixtures with a high sand mixing ratio and its prediction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1620 - 1626. (in Chinese))
- [11] 李培勇, 杨庆, 栾茂田, 等. 膨润土加砂混合物膨胀特性研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1333 - 1336. (LI Pei-yong, YANG Qing, LUAN Mao-tian, et al. Study of swelling properties of bentonite-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1333 - 1336. (in Chinese))
- [12] SABA S, DELAGE P, LENOIR N, et al. The microstructure of compacted bentonite-sand mixture[J]. Engineering Geology, 2014, **168**: 141 - 148.
- [13] KAWARAGI C, YONEDA T, SATO T, et al. Microstructure of saturated bentonites characterized by X-ray CT observations[J]. Engineering Geology, 2009, **106**(1/2): 51 - 57.
- [14] QUINA M J, BORDADO J C, QUINTA-FERREIRA R M, et al. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: an overview[J]. Waste Management, 2008, **28**(11): 2097 - 2121.
- [15] YE W M, ZHENG Z J, CHEN B, et al. Effects of pH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. Applied Clay Science, 2014, **101**: 192 - 198.
- [16] SUN DA, ZHANG L, LI J, et al. Evaluation and prediction of the swelling pressures of GMZ bentonites saturated with saline solution[J]. Applied Clay Science, 2015, **105**: 207 - 216.
- [17] 徐超, 李志斌, 高彦斌. 溶液特征对 GCL 膨胀和渗透特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, **37**(1): 36 - 40. (XU Chao, LI Zhi-bin, GAO Yan-bin. Influence of solution characteristics on swelling and hydraulic performance of geosynthetic clay liner[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, **37**(1): 36 - 40. (in Chinese))
- [18] 李晓勇, 朱建斌, 胡雨燕. 焚烧灰渣物理化学性质的研究进展[J]. 上海应用技术学院学报, 2008, **8**(2): 116 - 120. (LI Xiao-yong, ZHU Jian-bin, HU Yu-yan. A research on characteristic of incineration residues[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology, 2008, **8**(2): 116 - 120. (in Chinese))
- [19] 王雷, 金宜英, 聂永丰. 高钙特征焚烧飞灰的加速碳酸化处理及对重金属浸出特性的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3399 - 3404. (WANG Lei, JIN Yi-ying, NIE Yong-feng. Accelerated carbonation of high Ca content municipal solid waste incineration fly ash and impact on leaching of heavy metal[J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3399 - 3404. (in Chinese))
-

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 上海分元土木工程科技有限公司
后插 1 南京嘉兆仪器设备有限公司
后插 2 济南普业机电技术有限公司