

受铅污染的土 - 膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究

范日东, 杜延军*, 陈左波, 刘松玉

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 土 - 膨润土系竖向隔离墙广泛应用于工业污染场地修复工程中。由于黏土与污染液的相互作用, 隔离墙的工程性质将发生改变。通过一维压缩固结试验, 研究高岭土 - 膨润土系竖向隔离墙材料与硝酸铅溶液相互作用下的物理性质、压缩固结和渗透特性的改变规律, 并给出机理解释。引入评价天然重塑黏土的压缩和渗透特性的归一化孔隙比 e/e_L 和孔隙指数 I_v 概念, 进一步评价分析受铅污染土 - 膨润土系竖向隔离墙材料的压缩和渗透特性。

关键词: 隔离墙; 膨润土; 高岭土; 压缩; 渗透

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2013)05 - 0841 - 08

作者简介: 范日东(1988 -), 男, 博士研究生, 主要从事环境岩土方面的研究。E-mail: ridong.van@gmail.com。

Compressibility and permeability characteristics of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills

FAN Ri-dong, DU Yan-jun, CHEN Zuo-bo, LIU Song-yu

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Soil-bentonite (SB) vertical cutoff walls are widely used in remediation of contaminated lands. The engineering properties of SB cutoff wall backfills will dramatically change due to their interaction with contaminants. However, investigation of the effect of heavy metals on the compressibility and permeability characteristics of SB backfills is very limited. A series of oedometer tests are conducted for kaolin-bentonite mixtures being potentially used as SB backfills. The soil samples are prepared with designed bentonite contents of 5%, 10%, and 15%, lead concentrations of 0, 5, 10, and 50 mg/g, and water content of approximate liquid limit. The results show that after lead contamination, the liquid limit, pH, specific surface area, compression index, and permeability coefficient of the soils considerably change regardless of the bentonite content. To further interpret the test data, the concepts of the generalized state parameter (e/e_L) and the void index (I_v) are adopted to evaluate the compression and permeability properties of the soils before and after lead contamination. The results suggest that e/e_L versus $\lg p$ and/or $\lg k$, and I_v versus $\lg p$ can be used as a useful engineering tool to characterize the compressibility and permeability properties of lead contaminated SB backfills. Finally, an empirical equation is proposed to generalize the permeability of the soils before and after lead contamination.

Key words: slurry cutoff wall; bentonite; kaolin; compressibility; permeability

0 引 言

土 - 膨润土系竖向隔离墙由于其抗渗能力强, 施工简便, 成本低廉等优势, 已被广泛应用于欧美发达国家的清洁地下水保护和污染场地隔离修复工程, 例如固体废弃物填埋场、城市工业污染场地污染物迁移隔离等防污抗渗工程。

针对土 - 膨润土系竖向隔离墙材料的砂土/黏土 - 膨润土混合土材料的压缩及渗透特性试验研究取得了较多成果。如 Yeo 等^[1]通过对砂土 - 黏土及砂土 - 膨润土混合土进行一维固结压缩及渗透试验, 发现压

缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、固结系数 C_v 及抗渗性能均随着细粒含量或膨润土含量的增加呈线性递增趋势。Sivapullaiah 等^[2]通过一维固结试验结果反算渗透系数的方法, 建立了 4 种砂土 - 膨润土混合土的孔隙比与渗透系数拟合经验关系。Malusis 等^[3]考察了干湿循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278100); 江苏省自然科学基金项目 (BK2010060, BK2012022); 东南大学基本科研业务费项目 (Seujq201107); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXLX_0103)

收稿日期: 2012 - 07 - 01

*通讯作者

作用下土-膨润土混合土渗透系数的变化,发现渗透系数在3次循环后呈500~10000倍增大。Malusis等^[4]提出考察改性添加剂对土-膨润土系竖向隔离墙材料工程特性改变的必要性,并研究了添加粉状及颗粒状活性炭后砂土-膨润土竖向隔离材料的压缩及渗透特性。Hong等^[5]和杜延军等^[6]则研究了添加沸石粉的土-膨润土混合土的压缩及渗透特性,试验结果均表明添加沸石粉并不显著影响混合土的压缩指数 C_c 和渗透系数 k 。

前述研究均以自来水或蒸馏水进行制样及试验,对隔离墙材料污染后的固结压缩及渗透特性的研究较少。事实上,污染场地内污染物由于渗流场-浓度场等驱使下会发生迁移;当隔离墙材料与污染物相互作用时,其物理性质和工程特性可能发生改变,原因可归纳为:①黏土颗粒双电层厚度的变化^[7-8];②黏土颗粒边面带电性变化并造成微观结构改变^[9-10];③黏土矿物等的溶蚀^[11-12];④黏土矿物与溶液间发生化学反应形成沉淀物^[13];⑤溶液的自身属性(黏滞度、极性)等^[14]。

作为对前述采用蒸馏水或自来水进行土-膨润土系竖向隔离墙材料压缩及渗透特性试验研究^[1, 2, 4-6]的拓展和延伸,本文采用高岭土-膨润土混合土作为竖向隔离墙材料,通过配制一定铅浓度(硝酸铅形式)高岭土-膨润土混合土,用以模拟重金属污染作用,进行系列基本性质参数测定及一维压缩固结试验,研究受铅污染前后混合土试样液限、压缩及渗透特性的变化规律;建立物理性质参数的改变与压缩和渗透特性变化规律间的联系;通过将Nagaraj等^[15]和Burland^[16]用以评价天然重塑黏土压缩特性的归一化孔隙比 e/e_L 及孔隙指数 I_v 扩展到受铅污染的混合土;考察采用归一化孔隙比 e/e_L 以及Sivapullaiah等^[2]所提出归一化方法建立混合土受铅污染前后渗透系数统一预测经验公式的可行性。

1 材料特性和试验方法

本次试验选用有普遍工程适用意义的商用高岭土(镇江地区产)模拟隔离墙墙体的原位土。膨润土选用商用膨润土(徐州地区产),两种土的基本物理性质见表1。

混合土备样由高岭土和膨润土按膨润土掺量(膨润土与高岭土两者间干土质量的百分比)为5%,10%和15%均匀混合,分别记为B5, B10和B15。传统施工方法下,膨润土掺量通常为3%~6%^[17-18]。当采用TRD工法(trench remixing and deep wall method)进行土-膨润土系竖向隔离墙施工时,每立方米土体中

可掺入50~150 kg膨润土^[19]。此时的膨润土掺量可达到16%(若土体含水率为液限)。

参考相关土壤质量评价标准^[20-21],取铅浓度(X)作为试样受铅污染程度的指标。试样铅浓度 X 定义为铅质量与混合土干土质量的比值(式(1)所示),分别取0, 5, 10, 50 mg/g,记为Pb0, Pb0.5, Pb1和Pb5。最终备样共12组,分别记为B5Pb0, B5Pb0.5, B5Pb1, B5Pb5, B10Pb0, B10Pb0.5, B10Pb1, B10Pb5, B15Pb0, B15Pb0.5, B15Pb1和B15Pb5。

$$X = \frac{m_{LN}}{m_{d,kao} + m_{d,ben}} \cdot \frac{Ar(P_b)}{Mr[P_b(NO_3)_2]} \quad (1)$$

式中 m_{LN} , $m_{d,kao}$ 和 $m_{d,ben}$ 分别为硝酸铅、高岭土及膨润土的干土质量; $Ar(P_b)$ 和 $Mr[P_b(NO_3)_2]$ 分别为铅的相对原子质量和硝酸铅的相对分子质量。

硝酸铅粉末固体按设计铅浓度 X 掺入混合土,加入与混合土约等质量的蒸馏水均匀拌合,并放置于塑料桶中封存15~20 d,每天搅拌约15 min。其后,测定各备样的界限含水率、比表面积等基本物理性质参数和pH值。液限采用碟式仪测定;塑限采用液塑限联合测定仪确定;比表面积采用电蓝法(AFNOR标准^[22])确定;pH测试方法按照ASTM标准^[23]。高岭土及膨润土的阳离子交换量及可交换阳离子含量的测定采用氯化钡缓冲液法:膨润土按照GB/T 20973—2007^[24],高岭土参考文献^[25]进行。

表1 膨润土和高岭土的基本性质

基本性质指标	膨润土	高岭土
相对密度 G_s	2.73	2.66
塑限 $w_p/\%$	88.2	19.5
液限 $w_L/\%$	331.4	32.3
土的分类	CH	CL
比表面积 $SSA/(m^2 \cdot g^{-1})$	733.98	45.67
pH	9.99	8.70
阳离子交换量 CEC $/(mmol \cdot 100g^{-1})$	78.07	6.61
可交换阳离子含量 $/(mmol \cdot 100g^{-1})$	膨润土	高岭土
钠	53.39	4.75
钾	0.53	0.34
钙	22.74	1.44
镁	1.41	0.08

一维压缩固结试验试样的制备方法与文献^[6]所述相同。取初始含水率小于其液限的备样加入蒸馏水,使初始含水率达到液限,充分拌合后分次填入环刀、捣实、饱和。设计试样初始含水率取各液限,实际初始含水率(见表2)与液限的比值为0.95~1.03。试样饱和及试验过程中所用硝酸铅溶液的浓度根据各试样实际质量、实际含水率和铅浓度计算获得。

除沿用不锈钢环刀和普通透水石外,固结仪容器

各部件均采用 PVC 防腐材料加工。固结试验加载按荷载率（加载增量与前一级荷载比值）为 1 进行，分为 3.125, 6.25 kPa 至最终级荷载为 1600 kPa，每级荷载加载 24 h。试验中硝酸铅溶液于每级加载前更换。

参考文献[2, 26, 27]的研究方法，各级加载下，试样渗透系数 k 根据太沙基一维固结理论计算得到：

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (2)$$

式中 C_v 为固结系数； m_v 为体积压缩系数； γ_w 为水的比重，取 9.81 kN/m³。

2 试验结果

各高岭土 - 膨润土混合土试样液限、比表面积及 pH 值随试样铅浓度的变化规律如图 1 所示。试样液限（图 1 (a)）和比表面积（图 1 (b)）随铅浓度增大而降低并趋于稳定，与未受铅污染各试样液限以及比表面积相比，当铅浓度为 0.5%，1.0%和 5.0%时，试样液限分别降低了 15%~24%，16%~30%和 21%~32%；试样比表面积分别降低了 17%~23%，29%~40%和 38%~46%，并且两者的降低幅度随膨润土掺量提高而增大。

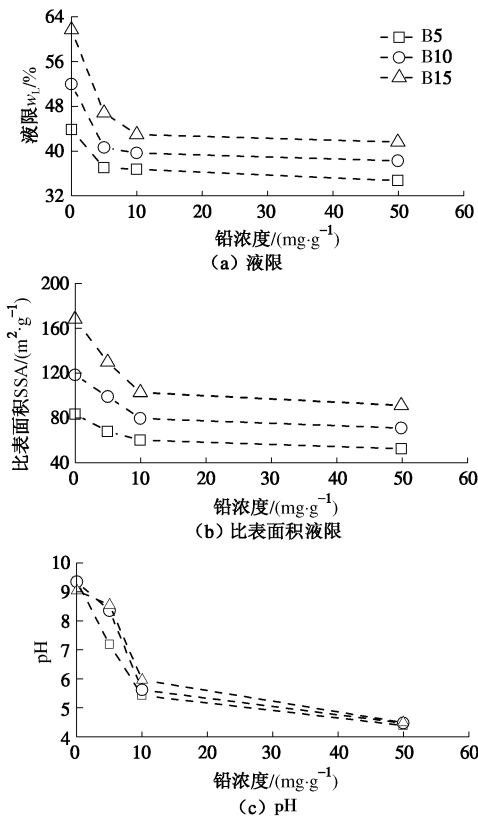


图 1 试验液限(a)、pH 值(b)及比表面积(c)随 Pb²⁺ 浓度变化
Fig. 1 Change of properties with lead concentration: (a) liquid limit; (b) specific surface area; and (c) pH

前述试样液限随铅浓度增大所呈现的变化规律与 Di Maio^[8]及 Gajo 等^[28]分别以钠基蒙脱土和膨润土

为研究对象，考察盐溶液 (NaCl、KCl、CaCl₂) 和无机酸碱溶液 (HCl、NaOH) 的浓度对液限影响的试验结论一致。所不同的是，本试验以高岭土 - 膨润土混合土为研究对象，模拟原位土 - 膨润土竖向隔离墙材料，并非单一的膨润土。

由于硝酸铅溶液呈酸性，且溶液 pH 值随浓度增大而降低（如图 2 所示），从而影响试样 pH 值（图 1 (c)）。试样 pH 值同样随铅浓度增大而降低，铅浓度为 Pb0.5, Pb1 和 Pb5 时分别较未受铅污染时降低约 5%~23%，34%~42%和 50%~53%。

其次，图 1 显示同一铅浓度下，膨润土掺量越高则试样液限及比表面积相对越大。这是由于膨润土中蒙脱石黏土矿物具有比表面积大、水化后持水能力强等特点；高岭土的比表面积、液限则明显低于膨润土（见表 1）。

各试样均位于塑性图 A 线之上，如塑性图（图 3）所示。未受铅污染试样中，膨润土掺量为 10%和 15%的试样属于高液限黏土；膨润土掺量为 5%时，属于低液限黏土。受铅污染试样均属于低液限黏土。

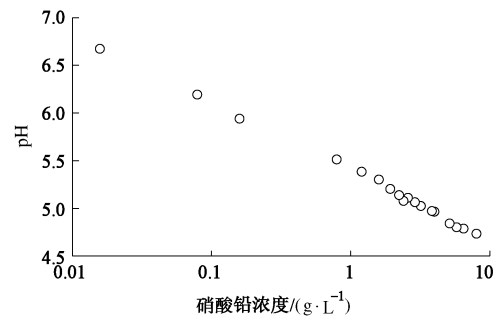


图 2 硝酸铅溶液 pH 值随其浓度变化
Fig. 2 Change of pH with lead nitrate concentration

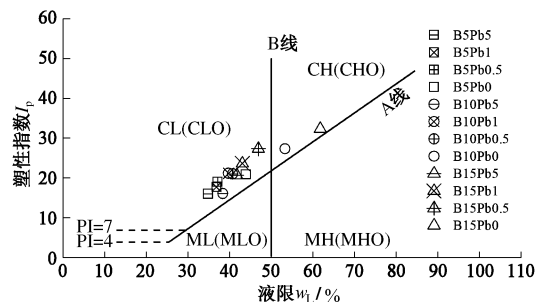


图 3 试样的塑性图

Fig. 3 Plasticity chart of soils

图 4 为通过一维压缩固结试验所得试样压缩曲线。随着固结应力的增大，试样压缩曲线逐渐趋于一致。试样实际初始含水率 w_0 及压缩指数 C_c 见表 2；压缩指数随液限及铅浓度的趋势变化如图 5 所示。

由图 5 (a) 可知，受铅污染前后的各组试样压缩指数与液限存在良好的正相关性，试样液限越高则

其压缩性相对越大。试验数据点位于文献[6]中根据膨润土掺量为 5% 和 10% 的高岭土 - 膨润土混合土试样所得结果的略下方。这主要是由于试样受到铅污染后造成试样压缩性的减小所致, 并且文献[6]所提出经验关系的试样初始含水率与液限比值 (w_0/w_L) 的范围介于 0.95~1.25 倍。结合文献[6, 29]中初始含水率约为液限 1.0 倍的数据点, 可建立受铅污染前后的高岭土 - 膨润土混合土试样压缩指数随液限的线性经验关系 (判定系数 R^2 为 0.961):

$$C_c = 0.0132(w_L - 20) \quad (3)$$

表 2 试样实际初始含水率 w_0 及压缩指数 C_c

Table 2 Initial water content and compression index for all samples

试样编号	$w_0/\%$	C_c	试样编号	$w_0/\%$	C_c
B5Pb5	33.2	0.189	B5Pb0.5	37.2	0.198
B5Pb1	35.7	0.215	B5Pb0	41.8	0.339
B10Pb5	39.1	0.255	B10Pb0.5	40.3	0.290
B10Pb1	39.0	0.256	B10Pb0	51.1	0.459
B15Pb5	42.1	0.313	B15Pb0.5	48.5	0.344
B15Pb1	43.0	0.310	B15Pb0	62.7	0.564

图 5 (b) 显示试样压缩指数随试样铅浓度的变化趋势: ①铅浓度为 Pb5、膨润土掺量为 5%, 10% 和 15% 的试样压缩指数较各自未受铅污染状态时相比, 分别降低了约 33%, 27% 和 27%; ②同一膨润土掺量下, 铅浓度的高低 (Pb0.5, Pb1, Pb5) 对试样压缩指数的影响较小, C_c 变化幅度约 10%~12%。

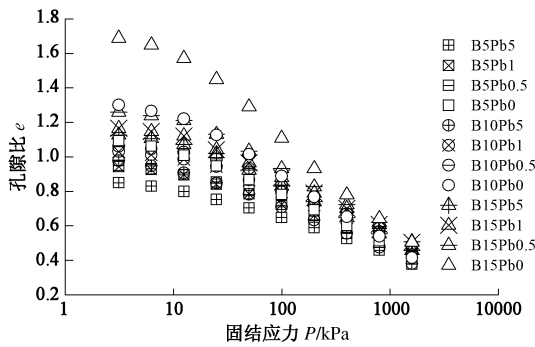


图 4 试样的压缩曲线

Fig. 4 Compression curves

图 6 为试样渗透系数与孔隙比变化关系, 若忽略最初两级加载中部分离散数据 (包括 3.125 kPa 下 5 个数据点及 6.25 kPa 下 2 个数据点), 各试样 $e - \lg(k)$ 变化趋势呈线性。同一孔隙比下, 渗透系数随膨润土掺量减小及 (或) 试样铅浓度的增加而增大。膨润土掺量为 5%, 10% 和 15% 的 3 组试样中, 受铅污染试样渗透系数较之未受铅污染时分别增大 2~6 倍、2~14 倍和 2~15 倍。此外, 同一膨润土掺量下, 渗透系数随铅浓度增加而增大的幅度呈逐渐降低的趋势。这一变化规律与 Mishra 等^[30]研究 NaCl 和 CaCl₂ 溶液的浓度对天然黏土 - 膨润土防渗垫层材料渗透系数影响的试验结果一致。

由图 6 可知, 采用受重金属污染土体与膨润土掺合后作为竖向隔离墙材料将极可能造成墙体抗渗性能降低, 因此施工和设计时需对此类的原位土慎重使用, 这一点并未在以往报道^[17, 31]中引起重视。

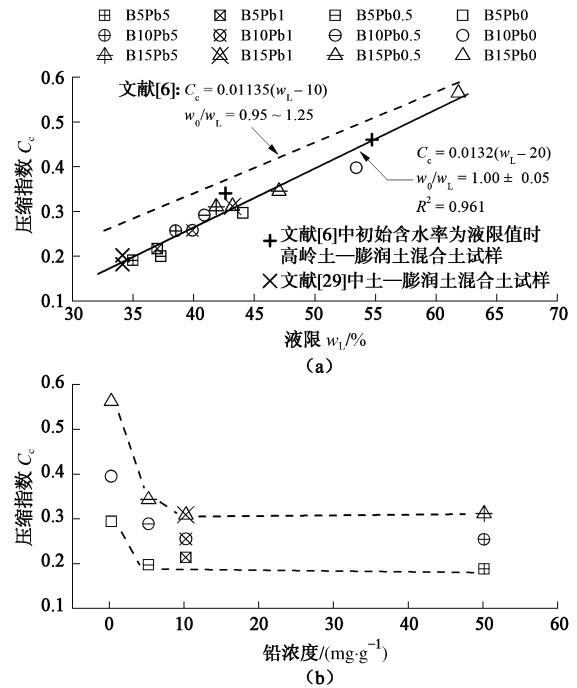


图 5 试样压缩指数与液限及铅浓度关系

Fig. 5 (a) Compression index versus liquid limit, (b) Compression index versus lead concentration

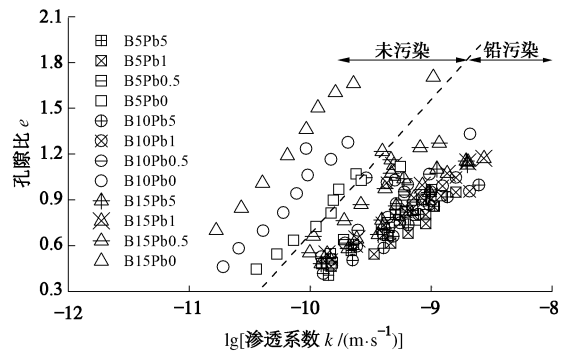


图 6 试样渗透系数随孔隙比变化

Fig. 6 Change of void ratio with permeability

3 讨论

3.1 对试样物理力学特性变化规律的解释

Mitchell 等^[32]指出盐溶液及酸碱溶液与黏土相互作用 (水 - 土相互作用), 造成物理性质及工程特性改变的最主要机理可归结为对于土颗粒双电层厚度以及黏土微结构 (边面带电性) 的影响。Sridharan 等^[33]则指出, 蒙脱石类黏土 (montmorillonitic soils) 和高岭石类黏土 (kaolinitic soils) (工程特性分别与蒙脱石和高岭石相同的黏土) 的液限、渗透系数和压缩指数分别在这两种机理作用下呈相反的变化规律。

根据扩散双电层模型理论, 双电层厚度与电解质的化合价以及其浓度的平方根呈反比。由于高岭土 - 膨润土混合土受到硝酸铅溶液 (考虑到土中水使得硝酸铅溶解称为溶液) 的污染, 使得 Pb^{2+} 与膨润土颗粒表面的可交换性阳离子 (例如 Na^+ 、 Ca^{2+}) 发生阳离子交换, 而 Pb^{2+} 的化合价 (二价) 高于钠、钾离子 (一价), 因此随着铅浓度的逐渐增大, 膨润土颗粒表面的双电层厚度变薄、持水能力减弱、颗粒间斥力位能减小, 使得土颗粒团聚。本文中试验结果中关于试样液限、压缩指数及渗透系数随试样铅浓度的变化趋势 (图 1 (a)、图 5 (b)、图 6 反映了扩散双电层理论模型理论的观点。

此外, 结合斯特恩双电层模型可知, 硝酸铅溶液不仅压缩了扩散双电层, 而且使得反离子 (Pb^{2+}) 由扩散层靠近黏土颗粒表面, 形成斯特恩层 (stern layer) [34]。因此, 双电层包括斯特恩层和扩散双电层两部分。斯特恩层的厚度大约与被吸附于表面的阳离子的水合离子直径一致 (即单层吸附于表面的水合阳离子的厚度) [35]。化合价均为二价时, Pb^{2+} 的水合离子半径 (0.401 nm) 小于可交换阳离子钙、镁离子 (0.412, 0.428 nm), 这进一步地抑制了双电层厚度。金属离子的水合离子半径可参考文献 [36]。

另一方面, 文献 [9-10, 37] 详细研究了孔隙液 pH 值及离子浓度等化学因素对于高岭土微结构的改变规律, 并以此分析高岭土物理性质及工程特性的变化机理。例如, Wang 等 [10] 的试验结果显示孔隙液 pH 小于高岭土颗粒边缘等电点 (IEP_{edge}) 时, 高岭土颗粒间呈边 - 面缔合的絮凝结构, 具有较高压缩性; 反之, 高岭土颗粒间呈面面缔合的分散结构, 压缩性由于双电层斥力增强而降低。Sridharan 等 [33] 指出, 颗粒间的引力 (长程范德华引力) 是影响高岭石类黏土物理性质及工程特性的主要因素, 高岭石类黏土由于孔隙水离子浓度升高, 颗粒间逐渐形成边 - 面絮凝缔合, 液限随之升高 (持水能力增强); 而双电层厚度的变薄造成粒间斥力变化对液限的影响并不显著。

本次研究中, 试样液限及压缩指数由于铅浓度增大、pH 值降低而减小的变化规律 (图 1 (a) 及表 2 所示) 与高岭石黏土物理性质及工程特性变化性状的结论相反; 更接近于钠基蒙脱石和钠基膨润土的研究结果 [8, 28, 33]。因此就本文试验结果而言, 膨润土掺量为 5%~15% 的高岭土 - 膨润土混合土试样受铅污染后, 其物理性质及工程特性变化规律更接近于蒙脱石类黏土的土性, 控制机理为铅对土颗粒双电层厚度 (亦即粒间斥力) 的影响。后续的研究将结合沉降试验、扫描电镜观察及宾汉屈服应力试验进一步地分析受铅污染高岭土 - 膨润土类隔离墙材料的土性改变。

3.2 对试样压缩及渗透特性的归一化分析

Nagaraj 等 [15, 38-39] 以各级固结应力下孔隙比与液限状态时的孔隙比之比值 (e/e_L) 作为归一化指标, 建立了初始含水率为液限附近时重塑饱和和无胶结黏土的归一化孔隙比与固结应力和渗透系数的线性关系。Burland [16] 采用孔隙指数 I_v 对初始含水率为 1.0~1.5 倍液限下未经风干或烘干的天然沉积的重塑黏土的压缩曲线进行归一化处理。研究表明, 这两种归一化评价方法同样适用于高岭土 - 膨润土类隔离墙材料 [6]。

各试样归一化压缩曲线如图 7 (a) 所示, 受铅污染试样归一化压缩曲线基本重合, 并可建立受铅污染试样归一化孔隙比压缩曲线经验公式

$$e/e_L = 1.199 - 0.237 \lg p \quad (4)$$

判定系数 R^2 为 0.953。对于初始含水率为液限附近未受铅污染试样, 其归一化压缩曲线则可参考文献 [6, 39, 40] 等根据重塑天然黏土及混合土所获得的试验结论。

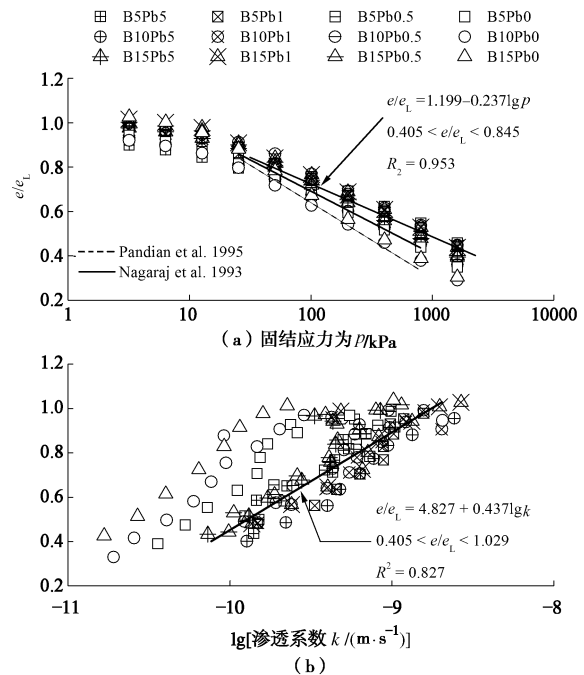


图 7 归一化孔隙比 e/e_L 的归一化压缩曲线及与渗透系数 k 关系
Fig. 7 (a) Generalized parameter e/e_L versus consolidation pressure; (b) Permeability for samples with different lead concentrations

相同归一化孔隙比下, 受铅污染试样渗透系数更为接近, 但明显大于未受铅污染试验的渗透系数, 如图 7 (b) 所示。本文试验结果显示, 不能采用归一化孔隙比建立受铅污染前后试样渗透系数统一预测式 (5); 就受铅污染的各组试样而言, 则能够建立归一化孔隙比与渗透系数经验关系

$$e/e_L = 4.827 + 0.427 \lg(k) \quad (5)$$

且具有良好的相关性, 判定系数 R^2 为 0.827。未受铅污染试样渗透系数预测可参考文献 [6] 的试验研究结

果。

受铅污染前后，试样液限均介于 25%~160%，土性分类位于塑性图 A 线之上（图 3），且初始含水率控制为液限，因此可采用 Burland 所提出固有压缩曲线（ICL）考察其压缩性。图 8 为本文试验结果的孔隙指数 I_v 与固结应力关系，当固结应力小于 25 kPa 时固有压缩曲线无法重合；随着固结应力的增大，固有压缩曲线与 Burland^[16]所提出经验公式相一致。

本文固有压缩常量 C_c^* 结果（图 9（a））略位于 Burland^[16]所提出经验公式上方； e_{100}^* 结果（图 9（b））的结果则较之略为离散。分析原因在于，试验土体与 Burland^[16]采用天然黏土的黏土矿物成分与本文试验所采用高岭土和膨润土间的差别，以及受铅污染后试样土性的改变。

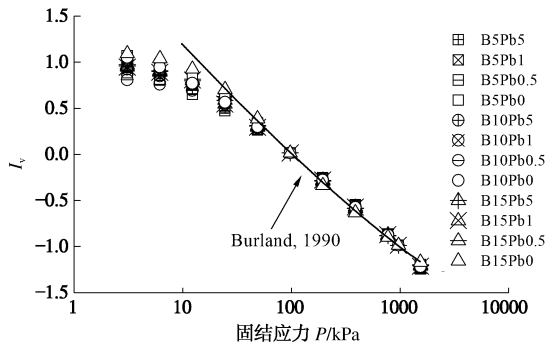


图 8 采用孔隙指数 I_v 的固有压缩曲线（ICL）

Fig. 8 Normalized compression curves using I_v concept

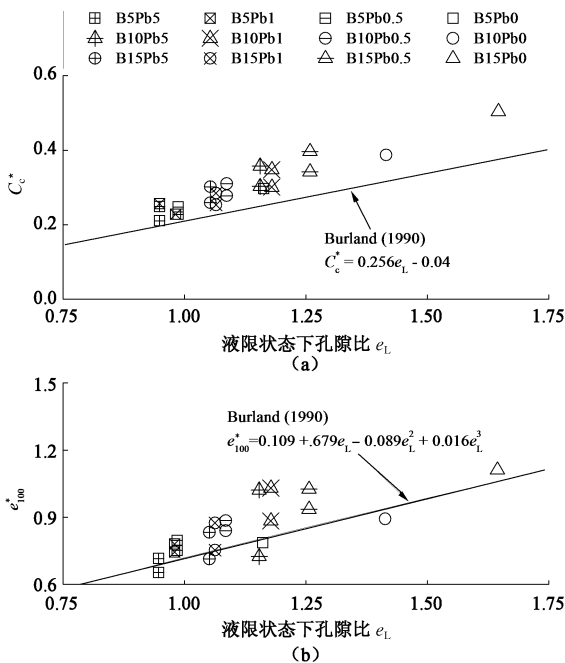


图 9 固有压缩常量 C_c^* 、 e_{100}^* 与液限孔隙比 e_L 关系

Fig. 9 (a) Constants of intrinsic compressibility C_c^* versus e_L , (b) e_{100}^* versus e_L

Sivapullaiah 等^[2]对砂 - 膨润土混合土经一维固结压缩试验反算的渗透系数提出通过液限及孔隙比的统

一经验公式。该方法基于 $e - \lg(k)$ 曲线具有线性的经验关系，且土体液限大于 50%。对 $e - \lg(k)$ 曲线进行线性拟合：

$$e = m \lg(k) + c \quad (6)$$

式中， m 为拟合经验公式的斜率； c 为拟合经验公式的截距，如图 10 所示。

基于 Sivapullaiah 等^[2]所提出渗透系数归一化方法，建立受铅污染前后高岭土 - 膨润土竖向隔离墙材料渗透系数的统一经验公式：

$$\lg(k) = \frac{e - 0.223w_L + 2.99}{0.0182w_L - 0.184} \quad (7)$$

判定系数 R^2 为 0.782。图 11 为通过一维固结试验所确定的渗透系数 ($k_{\text{试验}}$) 与经验公式 (7) 所预测的渗透系数 ($k_{\text{预测}}$) 的比较，显示预测结果与试验结果能较好吻合。

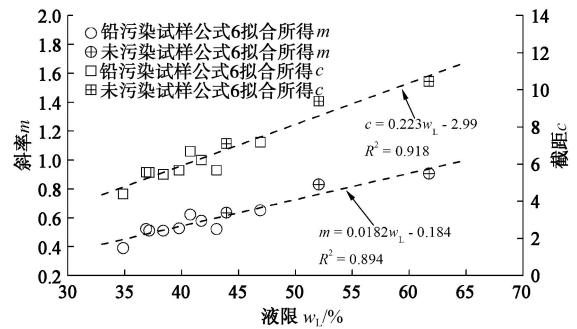


图 10 $e - \lg k$ 曲线斜率和截距与液限的经验关系

Fig. 10 Slope and intercept of $e - \lg k$ versus liquid limit

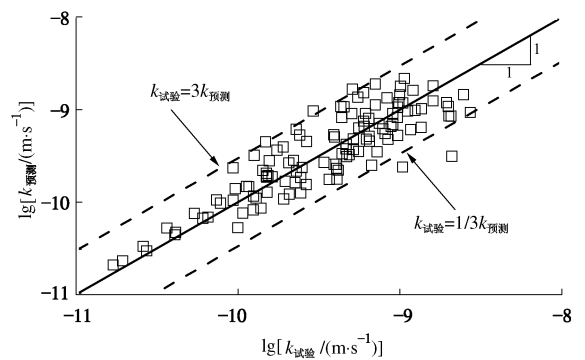


图 11 一维固结试验确定渗透系数与经验公式预测值的比较

Fig. 11 Correlation between measured hydraulic conductivity and predicted values by Eq. 7

从式 (7) 可知，对于受不同程度铅污染的高岭土 - 膨润土混合土，其渗透系数主要取决于孔隙比与液限。其中液限是反映土性的重要指标之一，同一孔隙比下，渗透系数随液限的减小（或铅污染程度的增大）而逐渐增大，且增大的幅度逐渐趋于平缓。

式 (7) 的物理意义可结合柯西 - 卡尔曼公式 (Kozeny-Carman equation) 进行解释。Chapuis 等^[41]

总结 11 项相关试验研究成果, 将柯西-卡尔曼公式的适用范围由砂、粉砂推广至渗透系数介于 $10^{-1} \sim 10^{-11}$ m/s 的绝大多数土类, 所预测结果范围介于 1/3~3 倍的实测值。由柯西-卡尔曼公式可知, 渗透系数可以表示为土体的孔隙比、比表面积和比重的函数: 与 $e^3/(1+e)$ 呈正比, 而与比表面积 (亦即液限, 两者呈正相关) 的平方呈反比。式 (7) 与柯西-卡尔曼公式在物理意义上均反映出渗透系数随孔隙比的减小、液限 (或比表面积) 增大而降低的变化规律。

4 结 论

(1) 受铅污染高岭土-膨润土隔离墙材料的液限、比表面积等物理性质参数、pH 值和压缩指数随试样铅浓度增加而减小, 铅浓度达到 10 mg/g 时变化趋势逐渐平缓; 受铅污染高岭土-膨润土隔离墙材料的渗透系数随试样铅浓度增加而增大, 受铅污染试样渗透系数较之未受铅污染时增大 2~15 倍。

(2) 本次试验研究结果显示, 高岭土-膨润土隔离墙材料在铅污染的作用下, 液限、渗透系数和压缩指数变化规律更接近于蒙脱石类黏土 (montmorillonitic soils), 其控制机理是双土层厚度 (亦即层间斥力) 的变化。进一步的土性变化的机理解释需要结合沉降试验、扫描电镜观察及宾汉屈服应力试验展开。

(3) 采用归一化孔隙比 e/e_L 和孔隙指数 I_v 均能较好评价铅污染高岭土-膨润土隔离墙材料的压缩特性; 固有压缩常量 C_c^* , e_{100}^* 结果与经验公式则存在偏差。受铅污染前后试样渗透系数未能与孔隙比 e/e_L 建立统一的经验关系, 但能够通过 Sivapullaiah 等^[2]所提出渗透系数归一化方法建立统一的经验预测公式。

参考文献:

[1] YEO S-S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(10): 1189 - 1198.

[2] SIVAPULLAIAH P, SRIDHARAN A, STALIN V. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(2): 406 - 413.

[3] MALUSIS M A, YEO S-S, EVANS J C. Hydraulic conductivity of model soil-bentonite backfills subjected to wet-dry cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(8): 1198 - 1211.

[4] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill

amended with activated carbon[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(5): 664 - 672.

[5] HONG C S, SHACKELFORD C D, MALUSIS M A. Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite amended soil - bentonite backfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **138**(1): 15 - 25.

[6] 杜延军, 范日东. 改性土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 49 - 54. (DU Yan-jun, FAN Ri-dong. Compressibility and permeability behavior of two types of soil-bentonite vertical cutoff wall backfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 49 - 54. (in Chinese))

[7] KASHIR M, YANFUL E. Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(5): 1034 - 1048.

[8] DI MAIO C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 695 - 707.

[9] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(6): 587 - 600.

[10] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(6): 601 - 617.

[11] GRATCHEV I, TOWHATA I. Compressibility of natural soils subjected to long-term acidic contamination[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **64**(1): 193 - 200.

[12] SHAW S A, JIM HENDRY M. Geochemical and mineralogical impacts of H₂SO₄ on clays between pH 5.0 and -3.0[J]. Applied Geochemistry, 2009, **24**(2): 333 - 345.

[13] YANFUL E K, SHIKATANI K S, QUIRT D H. Hydraulic conductivity of natural soils permeated with acid mine drainage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, **32**(4): 624 - 646.

[14] MONTORO M, FRANCISCA F. Soil permeability controlled by particle-fluid interaction[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, **28**(6): 851 - 864.

[15] NAGARAJ T S, MIURA N. Soft clay behaviour: Analysis and assessment [M]. Rotterdam: A A Balkema, 2001.

[16] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 329 - 378.

[17] ANDROMALOS K, FISHER M, BEARDSLEY M. Design and construction considerations for the use of slurry walls to

- construct water reservoirs in the denver formation[C]// Proceedings of the 32nd Annual Conference on Deep Foundations. Colorado Springs, CO, 2007.
- [18] PAUL D B, DAVIDSON R R, CAVALLI N J. Slurry walls: Design, construction, and quality control[M]. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1992.
- [19] KATSUMI T, INUI T, KAMON M. Chemical effects on the performance of soil-bentonite cut-off walls for in-situ containment[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt, 2009.
- [20] GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1995. (GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. 1995. (in Chinese))
- [21] HJ 350—2007 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)[S]. 2007. (HJ 350—2007 Standard of soil quality assessment for exhibition sites[S]. 2007. (in Chinese))
- [22] AFNOR. NF P 94—068 Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse[S]. France. 1993. (AFNOR. NF 94—068 Soil: Investigation and testing—Measuring of the methylene blue adsorption capacity of a rocky soil—Determination of the methylene blue of a soil by means of the stain test[S]. France, 1998. (in French))
- [23] ASTM. D4972—01 Standard test method for ph of soils[S]. United States, 2007.
- [24] GB/T 20973—2007 膨润土[S]. 2008. (GB/T 20973—2007 Bentonite[S]. 2008. (in Chinese))
- [25] 王虹, 崔桂霞. 用氯化钡缓冲液法测定土壤阳离子交换量[J]. 土壤, 1989, **21**(1): 49—51. (WANG Hong, CUI Gui-xia. Determine cation exchange capacity by method of BaCl₂ buffer[J]. Soils, 1989, **21**(1): 49—51. (in Chinese))
- [26] MISHRA A K, OHTSUBO M, LI L, et al. Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2011, **52**(1/2): 78—84.
- [27] HORPIBULSUK S, SHIBUYA S, FUENKAJORN K, et al. Assessment of engineering properties of bangkok clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(2): 173—187.
- [28] GAJO A, MAINES M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay[J]. Géotechnique, 2007, **57**(8): 687—700.
- [29] BAXTER D Y. Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [30] MISHRA A, OHTSUBO M, LI L, et al. Effect of salt concentrations on the hydraulic conductivity of the mixtures of basalt soil and various bentonites[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 2006, **51**(1): 37—43.
- [31] JOHNSON A I, FROBEL R K, CAVALLI N J, PETERSSON C B. Hydraulic Barriers in Soil and Rock[M]. Baltimore, MD: American Society for Testing and Materials, 1985.
- [32] MITCHELL J, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [33] SRIDHARAN A, HAYASHI S, DU Y J. Discussion of "Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils I. Surface charges and structural characterizations"[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(2): 241—242.
- [34] SRIDHARAN A, RAO S M, MURTHY N S. Compressibility behaviour of homoionized bentonites[J]. Géotechnique, 1986, **36**(4): 551—564.
- [35] VAN OLPHEN H. An introduction to clay colloid chemistry: For clay technologists, geologists, and soil scientists[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1977.
- [36] NIGHTINGALE JR E R. Phenomenological theory of ion solvation. Effective radii of hydrated ions[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1959, **63**(9): 1381—1387.
- [37] PALOMINO A M, SANTAMARINA J C. Fabric map for kaolinite: Effects of pH and ionic concentration on behavior[J]. Clays and Clay Minerals, 2005, **53**(3): 209—222.
- [38] NAGARAJ T S, SRINIVASA MURTHY B R. A critical reappraisal of compression index equations[J]. Géotechnique, 1986, **36**(1): 27—32.
- [39] NAGARAJ T S, PANDIAN N S, NARASIMHA RAJU P S R. Stress state-permeability relationships for fine-grained soils[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 333—336.
- [40] PANDIAN N, NAGARAJ T, RAJU P S R N. Permeability and compressibility behavior of bentonite-sand/soil mixes[J]. Geotechnical Testing Journal, 1995, **18**(1): 86—93.
- [41] CHAPUIS R P, AUBERTIN M. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 616—628.