

酸雨入渗对水泥固化铅污染土淋滤特性的影响研究

蒋宁俊¹, 杜延军^{1*}, 刘松玉¹, 李晨阳¹, 李文涛²

(1. 东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:以水泥固化铅污染土(Pb-CHMS)为研究对象,通过 Batch 淋滤试验和柔性壁土柱酸雨入渗试验,对 Pb-CHMS 在酸雨作用下的淋滤特性进行了研究。Batch 试验结果表明,当酸雨 pH=2.5 时,滤出液 pH 显著降低,钙(Ca)浓度显著增加;铅(Pb)浓度则随 pH 降低而减小。柔性壁土柱酸雨入渗试验结果表明,Pb-CHMS 渗透系数随渗透量和时间增加而降低,酸雨入渗导致渗透系数降低速率减缓;pH、Ca 和 Pb 溶出量随渗透量降低;并建立了 Pb-CHMS 室内土柱酸雨入渗时间与所模拟的固化污染土体酸雨入渗时间的关系。

关键词: 固化/稳定; 铅污染土; 酸雨; 淋滤

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)04-0739-06

作者简介: 蒋宁俊(1988-),男,博士研究生,主要从事环境岩土工程研究。E-mail: jnj1988_seu@yahoo.com.cn。

Leaching behaviors of cement-based solidification/stabilization treated lead contaminated soils under effects of acid rain

JIANG Ning-jun¹, DU Yan-jun¹, LIU Song-yu¹, LI Chen-yang¹, LI Wen-tao²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The effects of acid rain on leaching behaviors of cement solidified/stabilized lead contaminated soils are investigated. Laboratory tests including batch leaching and column infiltration tests are performed. The results of batching leaching tests show that pH and Ca concentration of equilibrium solution drop significantly when the initial pH of artificial acid rain is 2.5. Pb concentration of equilibrium solution otherwise decreases with the decrease of the initial pH of artificial acid rain. Through the column infiltration tests, it is found that the hydraulic conductivity of soils decreases with the increase of PVF. The decreasing rate in the case of the acid rain is lower than that in the case of the distilled water. pH, Ca and Pb concentration of effluent solution decrease with the increase of PVF. Meanwhile, in-situ acid rain infiltration time is correlated with laboratory acid rain infiltration time.

Key words: solidification/stabilization; lead contaminated soil; acid rain; leaching

0 引言

近年来,随着中国城市化进程不断推进,大中城市遗留工业场地污染已成为严重的环境问题。近 10 年来,国内外众多学者和工程人员都致力于工业污染场地修复技术的开发与应用。其中,固化/稳定技术(简称 S/S 技术)已被广泛地应用于污染场地及固体废弃物填埋处理中。与其他修复技术相比,固化/稳定技术有着成本较低、施工方便及对生物降解有良好阻碍的优点^[1]。江苏省环保厅 2011 年发布的《江苏省“十二五”重金属污染综合防治规划》,将其确定为土壤重金属污染治理推荐使用技术。目前关于水泥固化/稳定重金属污染土的研究主要集中在强度、淋滤和渗透特性方面^[2-5]。研究结果表明:重金属浓度、固化剂掺量和养护时间等,均对固化污染土的工程特性有较大影响。

目前,对于水泥固化/稳定重金属污染土在复杂环境作用下的耐久特性研究,国内则刚刚起步^[1]。其中,酸雨入渗对水泥固化污染土的耐久特性潜在危害尤其突出。

目前,中国东南沿海地区的酸雨污染十分严重。以南京地区为例,2010 年全市降雨平均 pH 为 4.9,最小值可达 2.89^[6],酸雨频率达到 50%。Kamon 等^[7]曾报道,降落到地表的酸雨中,可简化假设 2/3 以表面径流形式进入江河湖海;而其余 1/3 则渗入土壤(如图 1)。酸雨入渗会引起水泥固化重金属污染土(CHMS)pH 的降低,从而导致重金属从 CHMS 中溶

基金项目:国家自然科学基金项目(50878052,40972173);江苏省自然科学基金项目(BK2012022, BK2010060)

收稿日期:2012-04-26

*通讯作者

出,对周围水土环境造成危害。同时 CHMS 的 pH 降低也会导致其中钙 (Ca) 溶出,对其强度造成影响。目前,国内外尚鲜有关于酸雨对 CHMS 影响的相关报道,现有研究仅局限于酸雨对普通水泥/石灰改良土的作用^[7]。Kamon 等^[7]采用加速的室内入渗试验模拟石灰改良土在酸雨入渗下渗透系数的变化规律。然而,其并没有建立室内加速入渗试验时间和实际工程中石灰改良土体酸雨入渗时间的关系。因此,有必要研究酸雨入渗对 CHMS 淋滤特性的影响,并建立室内加速入渗试验时间和工程实践中固化污染土体中酸雨入渗时间的相互关系。目前研究 CHMS 的淋滤特性主要采用萃取试验 (extraction test)、半动态试验 (semi-dynamic test) 和动态试验 (dynamic test)^[1]。本试验所采用的 batch 淋滤和土柱酸雨入渗试验分别属于萃取和动态试验。

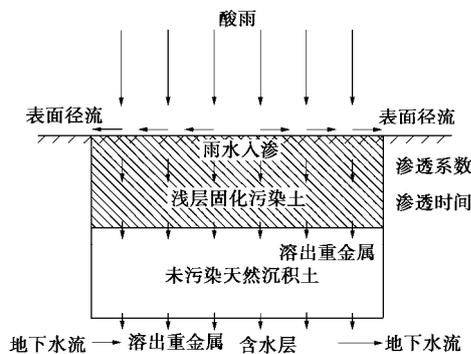


图1 酸雨入渗固化污染土体示意图

Fig. 1 Schematic diagram for infiltration of acid rain into solidified/stabilized contaminated sites

通过 Batch 淋滤试验和柔性壁土柱酸雨入渗试验,对酸雨入渗下,水泥固化/稳定铅污染土 (Pb-CHMS) 的淋滤性质进行研究。通过 Batch 淋滤试验,建立酸雨初始 pH 与淋滤液 pH、Ca 和铅 (Pb) 浓度的关系;通过柔性壁土柱酸雨入渗试验,建立酸雨作用下,渗透系数、滤出液 pH、Ca 和 Pb 浓度随滤出体积/时间的关系,同时建立了室内土柱酸雨入渗时间与工程实践中固化污染土体的酸雨入渗时间关系。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验所用土样为连云港地区海相软土,主要黏土

矿物成分为:伊利石—蒙脱石混层矿物(53%~61%)、伊利石(27%~31%)、高岭石(<10%)和绿泥石(<10%)^[8]。其基本物理、化学特性如表1所示。

试验所用水泥为南京海螺水泥有限公司生产的海螺牌普通硅酸盐水泥,主要化学成分为:氧化钙(CaO)49.18%,二氧化硅(SiO₂)26.01%,三氧化二铝(Al₂O₃)10.61%。重金属污染物采用国药集团化学试剂有限公司生产的硝酸铅(Pb(NO₃)₂)配制,原因是其具有较高溶解度(较强的阳离子活性),并且研究表明,硝酸根对水泥水化反应干扰较小^[9]。酸雨溶液由南京化学试剂有限公司生产的浓硝酸(HNO₃)和硫酸铵((NH₄)₂SO₄)配制而成。

表1 海相软土基本物理和化学特性

Table 1 Physical and chemical properties of marine soft clay

参数	数值
天然含水率/%	45.3
比重G _s	2.71
液限w _L	55.1
塑限w _p	25.8
pH (水土比1:1)	7.8
黏粒含量/%	25.7
粉粒含量/%	69.5
砂粒含量/%	4.8

1.2 试验方法

通过 Batch 淋滤试验和柔性壁土柱酸雨入渗试验,对酸雨入渗下,Pb-CHMS 的淋滤性质进行研究。

试样制备参照日本地盘工学会改良土制样规范 JGS—0821。将海相软土首先与 Pb(NO₃)₂ 溶液混合;再将水泥粉末加入拌匀的污染土中,混合搅拌 10 min。随后将试样分 3 层填入内径 50 mm、高度 50 mm 的铁制模具中;每层采用手工振动以排除气泡,并严格控制振动次数,使每层振动次数相同。模具填满振实后,用塑料薄膜将试样密封,并分组放入温度为 20℃、相对湿度为 95% 的标准养护室中养护。养护 3 d 后,取出脱模,再将试样送回养护室继续养护至指定龄期。各组试验中土样的 Pb 浓度、水泥掺量、养护龄期和干密度如表 2 所示。

人工酸雨溶液的 pH 和 SO₄²⁻ 含量根据南京地区酸雨数据确定^[6]。通过向蒸馏水中添加指定量(NH₄)₂SO₄,再添加一定体积 HNO₃ 溶液,使人工酸雨溶液达到指定的 pH 值和 SO₄²⁻ 浓度。各组试验中人工酸雨溶液的 pH 和 SO₄²⁻ 浓度如表 2 所示。

表2 各组试验试样及人工酸雨试验参数

Table 2 Experimental parameters of specimens and artificial acid rain for three types of tests

试验名称	初始Pb浓度 /% ^a	水泥掺量 /% ^a	养护龄期 /d	干密度 /(kg·m ⁻³)	人工酸雨pH	人工酸雨SO ₄ ²⁻ 浓度 /(mol·L ⁻¹)
Batch淋滤试验	0.5	12, 18	28/60	—	2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 7.0	0.001
土柱酸雨入渗试验	0.5	12	60	1202	4.5, 7.0	0.001

注:^a占干土质量的百分比。

Batch 淋滤试验根据 ASTM D5284—09 进行。将养护好的固化土试样研磨并过 2 mm 筛。称取 100 g 筛余土,按液固比 20 : 1(单位 : mL/g)加入 2000 mL 指定 pH 和 SO₄²⁻浓度的人工酸雨溶液中。随后使用德国 Heidolph 公司生产的 REAX 20 型翻转式振荡仪,以 30 rpm 的速度振荡 18 h。振荡后,将浊液过 0.45 μm 滤膜,并测量过滤后清液的 pH 及 Ca 和 Pb 浓度。

柔性壁土柱酸雨入渗试验采用 S5427B 型柔性壁渗透仪进行。根据预备试验结果,确定渗透压和围压分别为 400 kPa 和 450 kPa。酸雨入渗量采用南京地区年酸雨入渗量,可根据 Kamon 等^[7]提出的方法,按式 (1) 计算:

$$F = \frac{1}{3} R_{ave} AP \quad (1)$$

式中 F 为南京地区年酸雨入渗量 (mL); R_{ave} 为南京地区年降水量 (1100 mm/a); A 为试样横截面积 (1962 mm²); P 为南京地区酸雨频率 (50%)。则 F 计算结果如下:

$$F = \frac{1}{3} \times 1100 \text{ mm/a} \times 1962 \text{ mm}^2 \times 50\% = 360 \text{ mL/a} \quad (2)$$

试验进行过程中,定期收集滤出液,记录其体积以计算渗透系数,并测量滤出液 pH 及 Ca 和 Pb 浓度。

以上试验中,溶液 pH 值采用日本 HORIBA 公司生产的 D-54 型 pH/电导率计进行测量,Ca 和 Pb 浓度采用 IRIS Advantage inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) 进行测试。

2 试验结果

2.1 Batch 淋滤试验

(1) 清液 pH 值

Batch 淋滤试验过滤后清液 pH 值和 Ca 浓度可反映固化污染土受酸雨侵蚀程度。清液 pH 值与人工酸雨初始 pH 值关系如图 2 所示。图中 $C_i\%/j\text{d}$ 代表水泥掺量 $i\%$ 、养护 $j\text{d}$ 的试样。

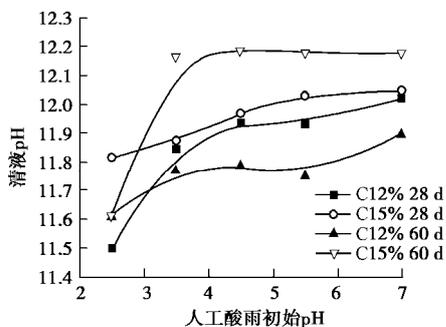


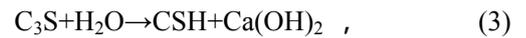
图 2 清液 pH 与人工酸雨初始 pH 关系

Fig. 2 Relationship between pH of equilibrium solution and pH of initial artificial acid rain

由图 2 可见,当酸雨初始 pH=2.5 时,清液 pH 较

酸雨初始 pH 3.5 时下降 0.1 ~ 0.6;当酸雨初始 pH 3.5 时,清液 pH 几乎保持不变。因此,当酸雨 pH 很低时 (pH=2.5),其对于 Pb-CHMS 侵蚀作用十分明显; pH 3.5 的酸雨对与 Pb-CHMS 侵蚀与正常雨水基本接近。

水泥掺量对于清液 pH 亦有显著影响。对于同一龄期试样,水泥掺量越高,则清液 pH 值越高。因为较高水泥掺量对应较多硅酸三钙 (C₃S) 含量,根据式 (3) (4),水泥水化反应和氢氧化钙 (Ca(OH)₂) 溶解导致清液中 OH⁻浓度增加,从而使清液 pH 升高。



(2) 清液中 Ca 浓度

清液中 Ca 浓度与人工酸雨初始 pH 关系如图 3 所示。当人工酸雨初始 pH=2.5 时,清液中 Ca 浓度达到 240 ~ 395 mg/L;当 pH 3.5 时,Ca 浓度则稳定在 190 ~ 230 mg/L 附近。根据式 (5) (6)^[10],在人工酸雨 pH 较低时,中和反应使更多水泥水化产物 (CSH 和 Ca(OH)₂) 溶解,从而使清液中 Ca 浓度升高。这一结果与清液 pH 随人工酸雨初始 pH 值变化规律相一致。

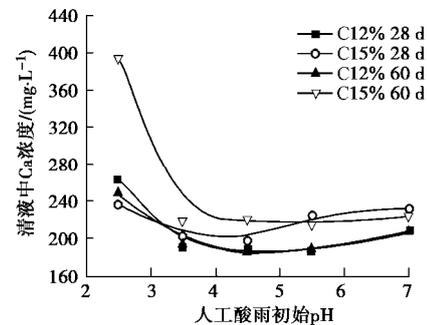
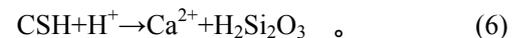
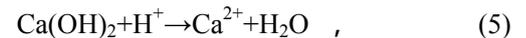


图 3 清液中 Ca 浓度与人工酸雨初始 pH 关系

Fig. 3 Relationship between Ca concentration in equilibrium solution and pH of initial artificial acid rain

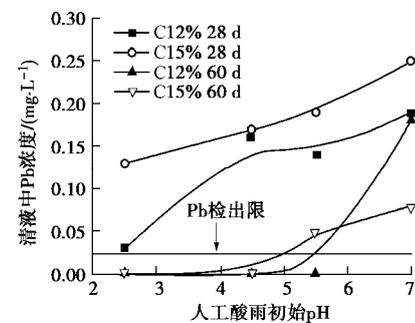


图 4 清液中 Pb 浓度与人工酸雨初始 pH 关系

Fig. 4 Relationship between Pb concentration in equilibrium solution and pH of initial artificial acid rain

(3) 清液中 Pb 浓度

图4所示为清液中Pb浓度与人工酸雨初始pH关系。对任意水泥掺量和养护龄期,清液中Pb浓度均随人工酸雨初始pH上升而升高。这一结果可以通过图2,5解释。图5为清液中Pb浓度与清液pH的关系:除C15%60d外,清液中Pb浓度随清液pH升高而增加0.12~0.18 mg/L。这是由于 $Pb(OH)_2$ 为两性氢氧化物,其在 $pH=10.4$ 时溶解度最低^[11];当 $pH>10.4$ 后,在过量OH作用下生成可溶物,从而使清液中Pb浓度反而随清液pH升高而增加。又由于图2显示,清液pH随酸雨初始pH增加而增加,故清液中Pb浓度随酸雨初始pH升高而升高。

由图4亦可见,养护龄期对于清液中Pb浓度有显著影响:60d试样对应清液中Pb浓度均较28d试样偏低。这表明较长的养护龄期可以强化重金属固化稳定效果。本试验中,图5虚线方框中所示C15%60d组清液中Pb浓度明显低于其他3组,固化效果最佳。

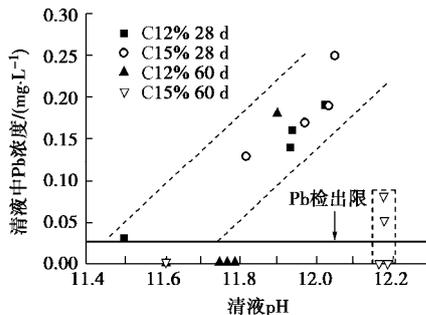


图5 清液中Pb浓度与清液pH关系

Fig. 5 Relationship between Pb concentration in equilibrium solution and pH of equilibrium solution

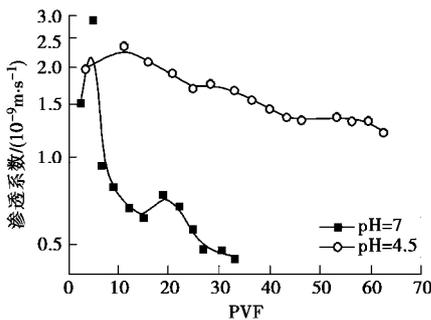


图6 渗透系数与PVF关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity and PVF

2.2 柔性壁土柱酸雨入渗试验

(1) 渗透系数

柔性壁土柱酸雨入渗试验可以模拟固化污染土体实际降雨入渗对Pb-CHMS的侵蚀作用。为了消除试样体积不同对试验结果的影响,定义PVF为累计滤出液体积与试样孔隙体积之比。图6为Pb-CHMS渗透系数随PVF变化关系。对酸雨和蒸馏水两种入渗液,渗透系数均随PVF增加呈现前期短暂升高,后期逐渐

下降的趋势。PVF 10时短暂升高可能是由于Pb-CHMS孔隙水溶液中自由水化产物随入渗液从土中滤出,从而导致孔隙体积变大,渗透系数增加。当 $PVF>10$ 后,自由水化产物几乎全部滤出,随PVF增加,水泥水化反应持续进行,生成的水化产物填充孔隙,使试样渗透系数不断降低。而对蒸馏水入渗情况,在 $PVF=20$ 附近,渗透系数有一个明显反弹。这可能是试验误差导致。

从图6中可见,在 $pH=4.5$ 的人工酸雨作用下,渗透系数下降速率较蒸馏水作用下缓慢。这是由于部分生成的水化产物被人工酸雨中 H^+ 中和,使水化产物填充孔隙的趋势减缓,从而使渗透系数下降速率减缓。

图7为 $pH=4.5$ 人工酸雨和蒸馏水作用下,渗透系数随时间变化关系。除最初阶段(0 至 2×10^5 s)之外,渗透系数均与入渗时间有较好指数函数拟合关系。拟合关系如下:

$$k_{4.5} = 1.76 \times 10^{-9} e^{(-t/390555)} + 1.22 \times 10^{-9} \quad (7)$$

$$k_{7.0} = 6.88 \times 10^{-10} e^{(-t/1546860)} + 2.31 \times 10^{-10} \quad (8)$$

式中 $k_{4.5}$ 为 $pH=4.5$ 人工酸雨作用下渗透系数(m/s); $k_{7.0}$ 为蒸馏水作用下渗透系数(m/s); t 为渗透时间(s)。拟合相关系数 R^2 分别为0.97和0.79。

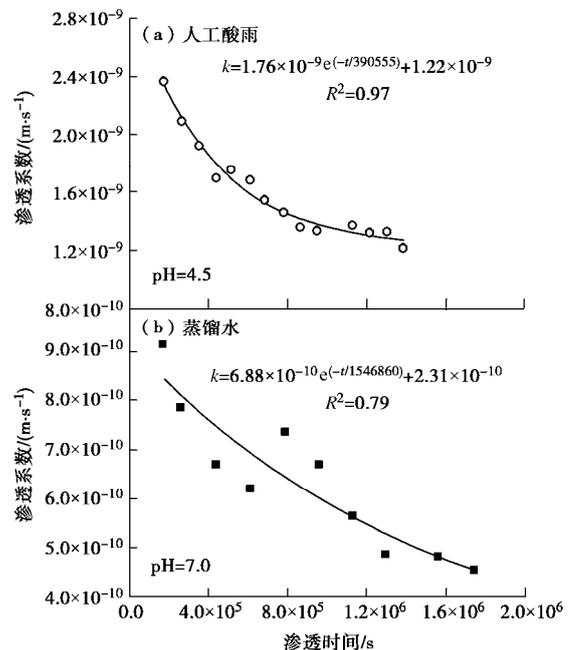


图7 渗透系数与入渗时间关系

Fig. 7 Relationship between hydraulic conductivity and infiltration time

(2) 滤出液pH值

图8为滤出液pH随PVF变化关系。当 $PVF<10$ 时,人工酸雨和蒸馏水作用下滤出液pH均随PVF增加而上升0.4~0.7。这是由于孔隙水溶液中的自由水化产物随入渗液从Pb-CHMS中滤出,导致滤出液pH

上升。当 PVF>10 后, 由于被淋滤出的水化产物逐渐减少, 滤出液 pH 缓慢下降。

(3) 滤出液中 Ca 和 Pb 浓度

图 9 为滤出液中 Ca、Pb 浓度与 PVF 关系。除蒸馏水作用下滤出液中 Pb 浓度低于检出限外, 滤出液中 Ca 和 Pb 浓度均随 PVF 增加而下降。这一结果与 Khat tab 等^[12]关于石灰改良土渗透特性的研究结果相一致。由于酸雨作用下 H⁺中和了 Pb-CHMS 中水化产物, 故滤出液中的 Ca 和 Pb 浓度均高于蒸馏水作用时。

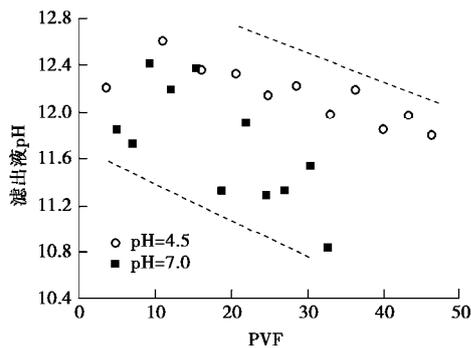


图 8 滤出液 pH 与 PVF 关系

Fig. 8 Relationship between pH of leachate and PVF

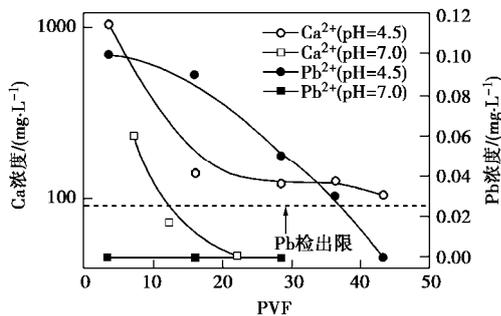


图 9 滤出液 Ca、Pb 浓度与 PVF 关系

Fig. 9 Relationship between Ca/Pb concentration in leachate and PVF

(4) 土柱入渗时间与固化污染土体入渗时间关系
柔性壁土柱酸雨入渗试验是一种室内加速试验。

本试验中采用的 400 kPa 的渗透压 (对应水力梯度 $i=816$) 远高于固化污染土体中实际降雨的入渗水力梯度 ($i=1$ 左右)。因此, 可以通过短期室内土柱酸雨入渗试验的结果, 来预测固化污染土体几个月乃至几年的酸雨入渗规律。通过室内土柱酸雨入渗试验所得出的渗透系数与入渗时间关系, 可建立 Pb-CHMS 在实际酸雨作用下, 室内土柱入渗时间与固化污染土体入渗时间的关系。通过对达西定律确定的单位时间内入渗流量积分, 可得到室内加速试验中, 酸雨入渗试样流量与入渗时间的积分形式表达式如下:

$$V_L = \int_0^t k(t) \cdot i \cdot A \cdot dt \quad (9)$$

式中 V_L 为室内试验入渗流量 (mL); $k(t)$ 为渗透系数

(cm/s); i 为水力梯度; A 为试样横截面积 (cm²); t 为入渗时间 (s)。

固化污染土体入渗流量可由下式得到

$$V_1 = F \times T \quad (10)$$

其中 V_1 为固化污染土体入渗流量 (mL); F 为年酸雨降雨量 (mL/a) (见附录); T 为固化污染土体预测时间 (s)。

再令室内试验与固化污染土体入渗流量相等, 如下:

$$V_L = V_1 \quad (11)$$

则可建立室内土柱酸雨入渗时间与固化污染土体入渗时间关系。对于南京地区, 由于其年酸雨平均 pH 值为 4.9, 略低于本试验中所采用的 4.5 的酸雨 pH 值。因此, 出于保守设计考虑, 可采用 pH=4.5 建立的室内土柱入渗时间与固化污染土体入渗时间关系, 确定在南京地区酸雨入渗固化污染土体的时间。将式 (7) 代入式 (9), 得固化污染土体酸雨入渗时间 T 与室内土柱入渗时间 t 关系如下:

$$T = 2.36 \times (1 - e^{-t/390555}) + 4.19 \times 10^{-6} t \quad (12)$$

通过式 (12), 便可建立室内试验土柱入渗时间与固化污染土体酸雨入渗时间关系, 为进一步预测 Pb-CHMS 在酸雨长期入渗下, 耐久特性的变化提供依据。

3 结 论

本文对 Pb-CHMS 的淋滤特性进行了研究, 主要结论如下:

(1) Batch 淋滤试验结果表明, 当酸雨初始 pH = 2.5 时, 滤出液 pH 显著降低, Ca 浓度显著增加; Pb 浓度则随 pH 降低而减小。

(2) 土柱酸雨入渗试验结果表明, 渗透系数随 PVF 增加呈指数函数下降趋势, 酸雨作用使其下降速度变缓; 滤出液 pH、Ca 和 Pb 溶出量均随 PVF 增加而降低。

(3) 通过室内加速试验, 建立了室内土柱试验酸雨入渗时间与固化污染土体酸雨入渗时间关系, 为进一步预测 Pb-CHMS 在酸雨长期入渗下耐久特性的变化提供依据。

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] United Kingdom Environment Agency (UK EA). Review of scientific literature on the use of stabilisation/solidification for the treatment of contaminated soil, solid waste and sludges[R]. Bristol: Environment Agency, 2004.
- [3] AL-TABBAA A, KING S D. Time Effects of three contaminants on the durability and permeability of a solidified sand[J]. Environmental Technology, 1998, **19**(4): 401 – 407.
- [4] 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))
- [5] BOARDMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D F. The influences of iron (III) and lead (II) contaminants on lime-stabilized clay[J]. Géotechnique, 2004, **54** (7): 467 – 486.
- [6] 南京市环境保护局. 2010年南京市环境状况公报[R]. 南京: 南京市环境保护局, 2011. (Nanjing Environment Protection Administration (Nanjing EPA). Report on the state of environment in Nanjing (2010)[R]. Nanjing: Nanjing Environment Protection Administration, 2011. (in Chinese))
- [7] KAMON M, YING C Y, KATSUMI T. Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(4): 91 – 99.
- [8] LIU S Y, SHAO G H, DU Y J, et al. Depositional and geotechnical properties of marine clays in Lianyungang, China[J]. Engineering Geology, 2011, **121**(1/2): 66 – 74.
- [9] CUISINIER O, BORGNE T L, DENELEE D, et al. Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization[J]. Engineering Geology, 2011, **117**(3/4): 229 – 235.
- [10] 朱伟, 李磊, 林城. 生物化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(6): 933 – 938. (ZHU Wei, LI Lei, LIN Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(6): 933 – 938. (in Chinese))
- [11] PARIAS S, YUET P K. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using Portland cement: a literature review[J]. Environmental Reviews, 2006, **14**(4): 217 – 255.
- [12] KHATTAB S A A, AL-MUKHTAR M, FLEUREAU J M. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, **19**(4): 358 – 366.