

上海浦东表层粘性土对城市垃圾污染质的阻隔能力

刘长礼 张 云 焦鹏程 王成敏

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄)

摘 要 室内实验和野外观测研究结果表明,浦东表层粘性土对总铁、 Cl^- 、 NH_4^+ 、COD 等都具有较强的净化能力;土中水的起始或临界水力梯度均大于实际的水力梯度,但‘ 隐渗流 ’对环境的影响不容忽视 ;泡气带土中不存在临界迁移深度,若不采取措施,填埋场会污染地下水 ;土的渗透性和压缩性在压实作用下,可得到明显改善,满足填埋场对粘性土垫层的基本要求。

关键词 表层粘性土 垃圾污染物 阻隔能力 上海浦东

上海浦东是我国最大的区域性综合性开发区。垃圾的处置是浦东面临的重要课题之一。该区地势低平、地形平坦。区内地表水系非常发育,沟、河纵横交错,水网密度高。潜水层与地表水呈互为补排的关系,潜水含水层水位正好在表层粘性土中变动,水力梯度不大(张锡根等,1996)。浦东表层粘性土普遍分布于区内,厚度一般为 1.0~3.0 m 之间。该区大量的垃圾直接堆放在该粘性土层之上,或以该层土作为垃圾填埋场的底部衬垫和盖层覆盖层材料(刘长礼等,1999)。所以,研究此层粘性土对污染物的截污能力,对于垃圾处置场的选址、填埋场的设计和管理具有十分重要的作用。

1 浦东表层粘性土的物质组成和工程性质

表层粘性土对污染物的阻隔能力是由土的各种成分和工程性质决定的(巴斯顿等,1993)。

1.1 物质组成

土的矿物成分测试和颗粒成分测试分析结果如表 1。

表 1 浦东表层粘性土矿物成分与颗粒成分分析结果

Table 1 The analysical results of minreal and particle for cohesive soil in Pudong

粒径/mm	组成/%	粒径/mm	组成/%
0.35~0.1	0.70	0.01~0.05	11.0
0.1~0.05	8.90	0.05~0.00	8.20
0.01~0.005	56.00	<0.002	15.62

颗粒分析结果表明,该土属典型的粉质粘土,颗粒均匀系数 $C_u = 15.33 > 5$,曲率系数 $C_q = 2.7$,级配良好。矿物成分测试表明,伊利石为 49.0%,绿泥石为 9.8%,高岭石为 13.0%,其它成分为28.2%。

1.2 孔隙级配

原状土样压汞测试分析结果表明,该土中毛细水空隙(孔径 $d = 1.0 \sim 200.0 \mu\text{m}$)含量为 3.655%,重力水空隙(孔径 $d > 200.0 \mu\text{m}$)含量为 0.092%,而结合水空隙(孔径 $d < 1.0 \mu\text{m}$)含量占 86.263%。因而,当土饱和时,其中充满了结合水,其次是毛细水,最少的是重力水。因此,土中结合水的运移渗流规律直接影响着土对污染物的阻隔能力。

1.3 土的化学成分

测试分析该土与污染物有关的化学成分,结果如表 2。

表 2 浦东表层粘性土与污染物有关的化学成分
Table 2 Chemical composition for the cohesive soil in surfase lager and the pallutants in Pudong area

化学成分	质量浓度/mg·kg ⁻¹	化学成分	质量浓度/mg·kg ⁻¹
SO ₄ ⁻	21.21	NO ₂	1.40
COD	17.87	NH ₄ ⁺	2.40
HCO ₃ ⁻	57.66	Fe	0.007
Cl ⁻	420.00	K ⁺	8.00
NO ₃ ⁻	85.80	Na ⁺	42.50

从表 2 可见,该土中 COD 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+

本文为国家自然科学基金资助项目‘ 固体废物填埋场粘性土垫层层阻隔能力研究’(批准号 :49502043)成果之一。
责任编辑 宫月萱。
第一作者 刘长礼,1963 年生,硕士,研究员,环境工程地质专业,从事固体废物地质填埋处置研究,邮编 050061。

等含量较高,即这些成分的本底值较大。这对该土的净化能力有一定的负面影响。

1.4 土的工程性质

大量的土工实验结果表明,该土层的工程性质指标为:含水量 24.68%、湿密度 1.976、干密度 1.585、土粒干密度 2.734、孔隙比 0.737、孔隙率 42.21%、饱和度 91.54%、液限 31.08%、塑限 20.85%(可塑性很好)、塑性指数 10.61、液性指数 0.442、内聚力 0.044 MPa、内摩擦角 13.67°(刘长礼等,1999)。

2 粘性土对垃圾污染物的阻隔能力

土层对垃圾污染物的阻隔能力,是由土层的截污能力、土层的渗透性、土中结合水的渗流规律(起始水力梯度 I_0 ,临界水力梯度 I_c)、污染质在土中的迁移转化及衰减规律综合性能来决定的。

2.1 浦东表层粘性土的渗透性能及土中水渗流运移规律

经过大量的微渗流、渗透-固结实验研究,得到该土的水平渗透系数为 $K_h = 2.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,垂直渗透系数为 $K_v = 1.3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。起始水力梯度 $I_0 = 3.75$ 、临界水力梯度 $I_c = 6.5$ 。该土中水的渗流速度 v 与渗透系数 K 、水力梯度 I 存在下列规律:

$$v = K_I (I < I_c = 6.5, K = 2.01 \times 10^{-7} - 9.56 \times 10^{-6}, \text{ 为一变化值}).$$
$$v = K_I (I > I_c = 6.5, K \text{ 为一定值}). \quad (1)$$

2.2 击实作用对土阻隔能力的影响

当粘性土的某些指标如渗透系数 K 或起始和临界水力梯度 (I_0 和 I_c) 达不到垃圾填埋场里衬垫层的要求时,可以采用机械夯实或堆载预压的方法来使土层压缩固结后,降低土的渗透性,提高土的临界水力梯度和起始水力梯度,使其达到要求。

2.2.1 粘性土与击实功能的关系 通过对浦东表层粘性土层的原状和扰动土样作微渗流实验、击实实验、渗透固结实验等表明,在粘性土击实初期,随着击实次数的增加,土的隔水性能增加较快。而在粘性土接受击实能量累积到一定阶段后,土的阻水性能的增加速率便趋于缓慢(图 1)。

图 1 还表明, N 等于 50 之前,随击实次数 N 的增加,透水性能减少很快。当 N 大于 50 后,随 N 的增加,透水性能减少缓慢。这对于工程实践具有十分重要的意义。

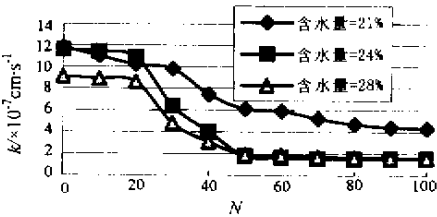


图 1 粘性土渗透系数与击实次数的关系曲线
Fig.1 The curves of relations between cohesive soil
asmotic coefficient and compacted times
K-渗透系数;N-击实次数

2.2.2 粘性土隔水性能与土的密度 (ρ_d) 的关系 对浦东表层粘性土做渗透实验和击实实验,得到含水量分别为 21%、24% 和 28% 时,该土的渗透系数 K 与土的密度 ρ_d 关系(图 2)。图 2 表明,随着该土击实密度的增大,土的隔水性能增长很快。它们之间存在下列回归方程的关系:

$$K = \exp(-8.83 \rho_d + 2.575) \text{ (相关系数 } r = 0.996, \text{ 均方差 } S = 0.0878) \quad (2)$$

方程(2)表明,土的渗透系数与土的密度都呈指数函数负增长。

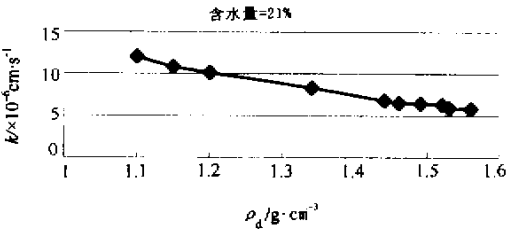


图 2 粘性土的渗透系数 K 与土的密度 ρ_d 关系曲线
Fig.2 The curves of relations between cohesive soil asmotic
coefficient and compacted density
K-渗透系数; ρ_d -土的密度

土的击实密度受到击实次数 N 的影响,二者的关系曲线如图 3。从图可见,击实次数 N 越大,土的击实密度 ρ_d 也越大。 N 大于等于 50 前随 N 的增加, ρ_d 的增加很快,此时土的夯实效果最佳。而当 N 大于 50 以后, ρ_d 增加缓慢,此时土的夯实效果不明显。这一结果对指导具体的工程施工具有很重要的意义。

2.3 粘性土压实作用与临界水力梯度的关系

如前所述,粘性土的临界水力梯度 I_c 是土的阻隔能力的重要指标之一,且 I_c 与土的压实程度是有直接关系的,压实程度越高, I_c 值就越大。表明土的

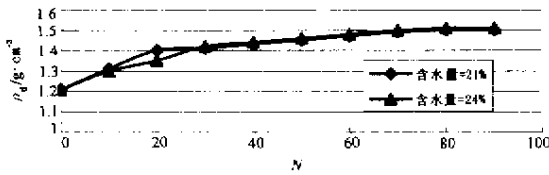


图 3 粘性土的击实密度 ρ_d 与击实次数 N 的关系曲线

Fig.3 The curves of relations between cohesive soil density and compacted times
 ρ_d -土的密度 ; N -击实次数

阻隔能力就越大。通过对该粘性土作渗透固结实验、微渗流实验研究,发现该土在 0.10 MPa 的压力作用下压缩固结稳定后,其起始水力梯度 I_0 由原状土的 3.75 增加到 6.5。而临界水力梯度则从原状土的 6.5 增加到 8.5。同时,该土的渗透系数也从原状土的 $K = 3.1 \times 10^{-6}$ cm/s 减少到 $K = 1.06 \times 10^{-7}$ cm/s。表明土的阻隔能力得到大大提高。

3 浦东表层粘性土对垃圾污染质的自然净化能力

3.1 粘性土层中污染质自然迁移与衰减规律性的野外研究

对某些垃圾场地的土层的不同深度、不同水平距离的污染成分测试,结果如下。

3.1.1 污染质在土层中的垂向迁移与衰减特征
研究中着重对场地土中 Fe (总铁)、 NH_4^+ 、 COD 、 Cl^- 等 4 种污染质现场取样作测试分析,结果如图 4 ~ 7。

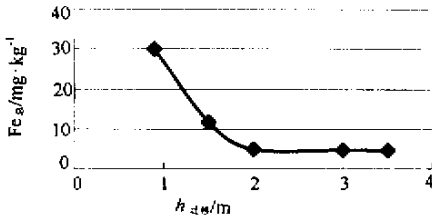


图 4 总铁在土中的垂向迁移衰减曲线

Fig.4 The attenuation curve of total irons in vertical soils

(1) 在土层埋深 1 m 处,总铁浓度为 29.5 mg/kg。而从 1.00 ~ 2.40 m 的深度范围内,总铁浓度迅速减少为 3.0 mg/kg。说明在 1.00 ~ 2.40 m 之间,土层对总铁的净化能力很大。在深度 2.40 m 之下,总铁浓度衰减很慢。

万方数据

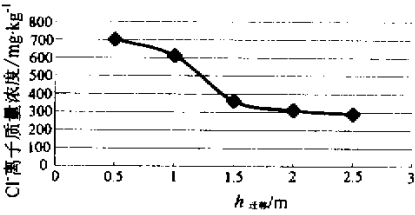


图 5 Cl^- 在土中的垂向迁移衰减曲线

Fig.5 The attenuation curve of Cl^- vertical soils

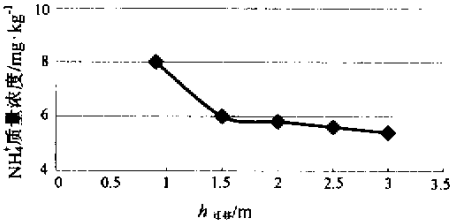


图 6 NH_4^+ 在土中的垂向迁移衰减曲线

Fig.6 The attenuation curve of NH_4^+ soils

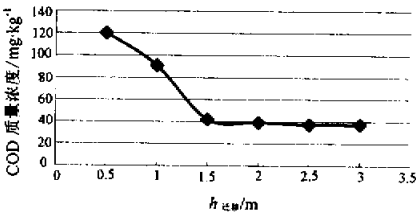


图 7 COD 在土中的垂向迁移与衰减曲线

Fig.7 The attenuation curve of COD in vertical

(2) Cl^- 浓度在 0.5 m 的深度以 700.00 mg/kg 经过厚度为 1.50 m 的土层后,迅速衰减到 250.00 mg/kg,衰减率为 64%。表明该土层对 Cl^- 的净化能力是很强的。

(3) NH_4^+ 在 1 m 深处的粘土层中,浓度为 8.0 mg/kg,经过 3.0 m 的土层后,其浓度减少为 5.2 mg/kg,衰减率为 35%,表明该土对其净化作用是显著的。

(4) 垃圾渗出液中以 COD 为代表的有机污染物的浓度从深度 0.5 m 处的 108 mg/kg,向下迁移到 2 m 深度时, COD 浓度只剩下 42.00 mg/kg,去除率为 61.6%。表明该土对其净化能力是很强的。

上述研究表明,该土层对总铁、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 COD 等污染成分的净化能力均非常强。

3.1.2 污染质在土层中的水平迁移与衰减特征

(1) 污染质在地下水中的衰减:现场观测结果

(表 3 和表 4)表明,在地下水中的污染物,经过土层的吸附、离子交换、化学反应和生物化学作用等,在水平方向上仍然要净化或衰减,土对污染物的净化效果明显。

表 3 某垃圾场地的污染物距场地 1 m 远处地下水中的衰减

Table 3 The attenuation characteristics of pollutants at 1 m distance to a dump			
污染组分	渗滤液的浓度 mg·L ⁻¹	1m 处地下水的 浓度/mg·L ⁻¹	衰减率/%
COD	28.0	8.1	71.07
NH ₄ ⁺	7.0	1.2	82.86
Cl ⁻	1271.5	1219.0	4.13
T _{Fe}	2.49	< 0.07	97.19

表 4 距某垃圾处置场几米处地下水中的污染物的水平衰减率

Table 4 The attenuation rate of pollutants at 1 m distance to a dump at few meters distance to a dump					
污染物组分	BOD	COD	NH ₄ ⁺ N	Cl ⁻	T _{Fe}
平均衰减率/%	98.5	92.7	74.0	44.7	82.5

(2)污染物在土层毛细带中的水平迁移特征 :从图 8 可以看出,距场地越远,土中的 COD、Cl⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的浓度就越小。说明在水平方向上,该土的净化能力较强。

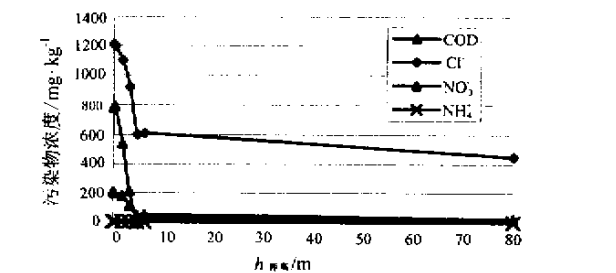


图 8 污染物在毛细带的水平迁移和衰减曲线

Fig.8 The attenuation curves of pollutant in horizontal zone of capillarity

3.2 渗滤液在土中的迁移速度及临界深度

3.2.1 迁移速度 迁移速度是指土中毛细水的垂向迁移速度(表 5)。

表 5 垃圾渗滤液在土中的垂向迁移速度数据

Table 5 The migration velocity data of waste in vertical soils

t/h	L _{迁移} /cm	L _{回归} /cm	t/h	L _{迁移} /cm	L _{回归} /cm
1.13	2		94	52	54.70
34	12	15.92	141	82	85.04
54	22	18.86	170	102	103.70
68.33	43	38.12	189	122	116.04

注 :L_{迁移}-实测迁移距离 ;L_{回归}-回归方程计算迁移距离。

迁移距离 L 与迁移时间 t 的关系的回归方程为 L = 0.6457t - 6.03(相关系数 r = 0.993, 均方差 S = 5.69),该方程是一直线方程(图 9)。对该直线方程求导,得渗滤液在土中的迁移速度为 :

$$v = aL/at = 0.6457 \text{ cm/h} = 0.00017941 \text{ cm/s}$$

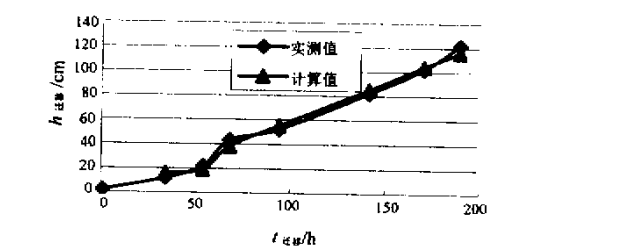


图 9 渗滤液在土中的垂向迁移深度与时间的关系

Fig.9 The curves of relation between migration depth and migration time

3.2.2 迁移的临界深度 所谓污染质在土中迁移的临界深度,是指在渗滤液的浓度与数量一定,且土中相关成分的背景值较低、土体对污染质可以起吸附、吸收、沉淀等作用、具有较大的净化能力时才存在。就浦东表层粘性土层来说,①大部分处于毛细带或潜水含水层中,且渗滤液的浓度都很大;②包气带粘性土隔水性并不十分好,垂直渗透系数 $K_v = 1.7 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。而上述计算表明,水在土中的迁移速度 $v = 1.794 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,为一常数,并不收敛;③土中有关成分的背景值较大(表 2)。在此情况下,污染质的迁移是不存在临界深度的。即污染物是要进入地下潜水含水层而污染地下水的,这一点已经得到证实。

4 结论

(1)浦东表层粘性土在天然状态下的密度和透性能等都达不到填埋场垫层的要求,但夯实作用对其性能改善效果很好,很快能达到填埋场对衬垫

层的基本要求。

(2)实验研究结果表明,该粘性土 $I_o = 3.75, I_c = 6.5$,大于通常情况下土中的水力梯度。但在 I 小于 I_o 时,土中仍有难以观测到的‘ 隐渗流 ’发生。垃圾填埋场中这种‘ 隐渗流 ’对场地环境的影响不容忽视。

(3)垃圾中的 COD、 Cl^- 、 NH_4^+ 、总铁等在浓度上,随着深度的增加而减小。在侧向上,随着迁移距离的增大,逐渐衰减,表明该粘性土层对这些污染质具有较强的自然净化能力。

(4)包气带土中渗滤液的迁移速度(或毛细水的运移速度)是一个常数,为 $v = 1.794 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。迁移距离 L 与时间 t 的关系为直线关系,直线方程为 $L = 0.6457t - 6.03$ 。污染质在包气带土中不存

在所谓的迁移临界深度,或者说,这个深度大于包气带厚度。如不采取措施,垃圾污染物会污染地下水。

参 考 文 献

刘长礼,张 云,王秀艳等. 1998. 城市垃圾地质填埋场地的优选方法. 地球学报, 19(4) 438 ~ 442.

刘长礼,张 云,王秀艳. 1999. 垃圾卫生填埋理论方法及工程技术. 北京 地质出版社.

张锡根,袁兆盾,刘长礼等编著. 1996. 城市垃圾堆埋的地质环境效应及地质处置——以上海浦东为例. 北京 地质出版社.

Albert J Kell. 1993. New approaches to estimation of solid waste quantity and composition. Journal of Enviroment Engineering. 119(2) 248 ~ 261.

Van Impe W F & Bouazza A. 1996. Barrere detancheite dans les sites de decharges :developpements recents. Revue Francaise de Geotechnique, 74 3 ~ 17.

The Capacity of Clayey Soil Liner at Surface Layer for Obstructing Garbage Pollutant in Pudong Area, Shanghai

Liu Changli Zhang Yun Jiao Pengcheng Wang Chengmin
(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei)

Abstract Investigation results show that clayey soils in Pudong area have quite strong purification ability against ΣFe , Cl^- , NH_4^+ and COD. The initial and critical hydraulic gradients of interspace water are higher than the factual hydraulic gradient. Nevertheless, the impacts of dormant flow on the environment cannot be ignored, and the garbage land-fill site would pollute groundwater. Under suppression, the penetrability and compressibility of the soils can be improved evidently, and, in consequence, the basic requirement of landfill site for clayey soil liner can be satisfied.

Key words surface clayey soil liner garbage pollutants obstructing capacity Pudong area