

不同配比新鲜生活垃圾渗透特性试验研究

张振营,章凌峰,吴大志,丁正坤,雷珊珊,王樱峰

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘 要: 在环境土工实验室,采用大型渗透模型槽试验仪器,对3种配比新鲜生活垃圾进行了室内模型槽试验研究。采用常水头试验方法,考虑7种初始密度(0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1 g/cm³),研究了生活垃圾的渗透特性及规律。试验结果表明:新鲜生活垃圾的渗透速率随饱和度的增大而增大,其关系可拟合成多项式,拟合系数大于0.99,建立了多项表达式;渗透速率随初始密度的增大而减小,其关系可拟合为直线,拟合系数大于0.96,建立了直线关系表达式;渗透系数与时间的关系可拟合为指数模型,拟合系数为0.8,建立了指数模型表达式;得到了新鲜生活垃圾渗透系数的量级范围,量级范围在10⁻³~10⁻² cm/s之间。研究结果可为垃圾填埋场的渗流分析提供参考。

关键词: 土力学;新鲜生活垃圾;大型渗透模型槽;常水头试验方法;渗透特性;指数模型

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851 (2016) 05-0796-07 **引用页码:** 091102

0 引 言

垃圾的渗透特性是垃圾填埋场工程性质研究的重要基础^[1]。垃圾填埋场中渗滤液的导排、回灌、扩散、稳定分析等需要确定垃圾的水力参数。垃圾的渗透特性可采用现场试验和室内试验进行研究,现场试验有现场抽水、注水及现场资料推算等方法,室内试验可采用渗透模型槽、渗透柱等试验方法。Oweis等^[2]采用现场注水、抽水试验方法,得到了垃圾的渗透系数数量级为10⁻³ cm/s。Landva等^[3]通过现场注水试验,得到垃圾渗透系数为1.0×10⁻³~3.9×10⁻² cm/s。Jang等^[4]采用常水头试验方法对某填埋场的垃圾进行了试验,得到渗透系数为2.9×10⁻⁴~1.1×10⁻³ cm/s。Shank^[5]对美国阿拉楚阿西南填埋场的垃圾,进行常水头渗透测试,得到垃圾的渗透系数为9.8×10⁻⁴~6.7×10⁻³ cm/s。钱学德等^[6]对降雨量与渗滤液产量关系进行反算,得出填埋场垃圾渗透系数为10⁻³ cm/s。由于现场试验方法存在操作困难、测量差异性大、代价高、耗时长等缺点,因此垃圾渗透特性研究经常采用室内试验

方法。Korfiatis等^[7]采用常水头渗透试验装置,对美国新泽西某填埋场具有半年龄期的垃圾进行了渗透试验,渗透系数为3.0×10⁻³~5.0×10⁻³ cm/s。Powrie等^[8]采用常水头试验方法研究了50m深度下垃圾的渗透特性,渗透系数数量级为10⁻⁵~10⁻² cm/s。Durmusoglu等^[9]采用变水头试验方法,得到填埋场垃圾的渗透系数为4.7×10⁻⁴~1.2×10⁻² cm/s。Reddy等^[10]对美国Orchard Hills填埋场垃圾试样,采用常水头试验方法,得到渗透系数为6.0×10⁻⁴~3.0×10⁻³ cm/s。Zhang等^[11]对3种不同配比新鲜生活垃圾进行了渗透试验研究,得到渗透系数为0.14×10⁻⁵~4.82×10⁻⁵ cm/s。张文杰等^[12]通过自制水平渗透模型,采用常水头试验方法,得到深层、中层及浅层垃圾渗透系数分别为3.56×10⁻⁴、3.50×10⁻³和4.81×10⁻² cm/s。介玉新等^[13]对北京某填埋场8个点进行现场采样,运用自行设计的渗透装置进行渗透试验,得到渗透系数为2.67×10⁻⁷~1.07×10⁻³ cm/s。瞿贤等^[14]采用渗透柱进行常水头试验,得到垃圾的渗透系数为1.35×10⁻⁴~1.26×10⁻³ cm/s。刘钊^[15]采用改装三轴

收稿日期: 2015-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178432,51478436);浙江省自然科学基金项目(LY14E080021);国家级大学生创新创业训练计划(201410338014);浙江理工大学研究生创新研究项目(YCX2014033);软土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学)开放基金资助项目

作者简介: 张振营(1963-),男,山东济南人,教授,主要从事环境岩土工程、地基处理等方面的研究。

仪,对苏州七子山现场垃圾进行了渗透试验,得到渗透系数为 $1.77 \times 10^{-6} \sim 9.85 \times 10^{-4}$ cm/s。柯瀚等^[16]采用大直径三轴渗透试验装置,常水头试验方法,得到不同降解龄期及不同竖向荷载下垃圾的渗透系数为 $8 \times 10^{-5} \sim 8.5 \times 10^{-4}$ cm/s。邱战洪等^[17]采用 Campbell 公式,推算出苏州七子山填埋场深层、中层和浅层垃圾的渗透系数在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/s 量级。王文芳^[18]对不同降解龄期的垃圾进行渗透试验,得到渗透系数为 $8.09 \times 10^{-6} \sim 3.92 \times 10^{-4}$ cm/s。陈云敏等^[19]对苏州七子山填埋场的垃圾进行了现场抽水试验,得到渗透系数为 10^{-4} cm/s 量级。

本文在上述研究的基础上,考虑室内试验尺寸效应,研制了大型渗透模型槽试验仪器。在环境土工实验室中人工配制生活垃圾,将生活垃圾分为易降解、难降解及不可压缩固体材料 3 大类,按国民经济的不发达、发展中及发达 3 个阶段将生活垃圾分类成 3 种不同配比的试样,其比例分别为:试样 1 的配比成分为 50%、15%、35%,试样 2 的配比成分为 65%、10%、25%,试样 3 的配比成分为 80%、5%、15%。为了模拟垃圾填埋场的渐近填埋压缩过程,将垃圾的初始密度控制为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1 g/cm³,利用大型渗透模型槽试验仪器,采用常水头试验方法,系统地对城市生活垃圾的渗透特性进行了试验研究。

1 试验仪器及试验材料

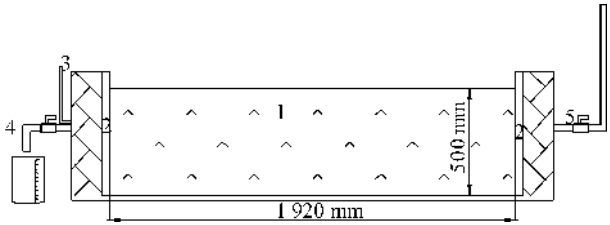
1.1 试验仪器

大型渗透模型槽试验仪器照片见图 1,该仪器由长为 1920 mm、宽为 500 mm、高为 580 mm 的渗透模型槽,直径 450 mm、高为 500 mm 的蓄水箱及进水管 3 部分组成。渗透模型槽由水泥砖砌成,内侧壁做防水涂层。槽壁厚 150 mm,槽内设置 6 个水位观测点,用于对比测压管水位高度变化,该观测点分别均等布置在长壁上,每个渗透槽的短侧壁与一根水管连通,进出水口内侧布置厚约 35 mm 透水石,渗透模型槽细部见图 2。蓄水箱是不锈钢制圆筒,外侧壁设玻璃测压管与圆筒连通,水箱内有控制球阀,蓄水箱均固定在墙壁上,蓄水箱底端至水平

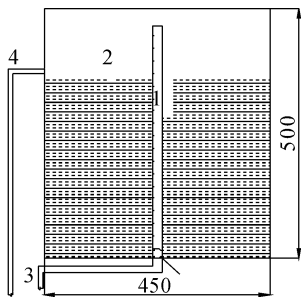
地面高度为 3960 mm,可控制水位高度为 3980~4340 mm,蓄水箱细部见图 3。蓄水箱的底部与进水管的一端连通。进水管的一端与给水管连通,另一端与渗透槽连通,进水端设有进水阀门。出水管为金属水管,顶部设有出水阀门和玻璃测压管,测压管底端至水平地面高度为 370 mm。



1. 渗透槽;2. 蓄水箱;3. 进水管;4. 出水管
图 1 大型渗透模型槽试验仪器照片



1. 垃圾试样;2. 滤水石;3. 测压管;4. 出水口;5. 进水口
图 2 渗透模型槽细部



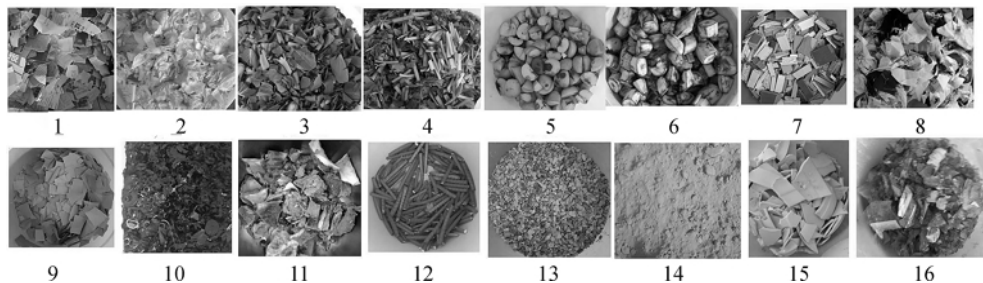
1. 测压管 2. 止水球阀 3. 出水口 4. 泄水管
图 3 蓄水箱细部(单位:mm)

1.2 试验材料

模拟国内城市经济发展的不发达、发展中及发达 3 个阶段,将新鲜生活垃圾分为 3 种不同配比的试样^[20]。新鲜垃圾的组成见表 1,新鲜垃圾试样的成分见图 4。

表 1 新鲜垃圾的组成

材料		易降解材料				难降解材料				不可压缩固体材料			
组成	废纸	白菜、青菜、芹菜	水果皮	木	纺织品	塑料	橡胶	骨头	金属	碎石、土	陶瓷	玻璃	
比例	4%	70%	20%	6%	30%	20%	20%	30%	5%	85%	5%	5%	
配比 1			50%				15%				35%		
配比 2			65%				10%				25%		
配比 3			80%				5%				15%		



1. 废纸;2. 白菜;3. 青菜;4. 芹菜;5. 苹果;6. 香蕉;7. 木;8. 纺织品;9. 塑料;10. 橡胶;11. 骨头
12. 金属;13. 碎石;14. 土;15. 陶瓷;16. 玻璃

图4 新鲜垃圾试样的成分

2 试验

按 CJJ/T 204—2013《生活垃圾土工试验技术规程》进行试验。

2.1 含水量试验

对每种配比的新鲜垃圾,取两组混合后的试样进行含水量平行实验,每组质量为 2 kg,放入 65 °C 恒温烘箱,烘干 24 h 至恒重,得到 3 种配比新鲜垃圾试样,其平均含水量分别为 $\omega_1 = 61.93\%$ 、 $\omega_2 = 122.2\%$ 、 $\omega_3 = 223.6\%$ 。

2.2 比重试验

采用真空抽气法测定新鲜生活垃圾的比重,取含水量试验过程中烘干试样 0.5 kg,粉碎试样尺寸至可通过 5 mm 筛,按四分法称取制备后试样 50 g 左右,放置于 500 mL 经抽气后的容量瓶中,注入 200 mL 经抽气后的煤油,使煤油完全浸没垃圾土。把容量瓶放置于真空干燥器内进行真空抽气,真空度需接近当地 1 个大气负压值,保持 1 h 以上,取出容量瓶后进行称重,得到 3 种配比生活垃圾的比重分别为 $G_{s1} = 2.10$ 、 $G_{s2} = 2.05$ 、 $G_{s3} = 2.00$ 。

2.3 渗透试验

根据初始密度 0.5 g/cm^3 及渗透模型槽的尺寸计算出垃圾的质量,将混合后的生活垃圾分 5 层填入模型槽内,采用人工压实的方法,分层堆填并均匀压实,并保证达到预设密度 0.5 g/cm^3 ,静止 24 h。试样准备完毕后,调节蓄水箱水位高度,控制水力梯度 $i = 2.0$ 。试验每 3 分钟控制进、出水口阀门,调节进水口流量与出水口流量,测试渗透速率 v 与饱和度 S_r 的关系。渗透速率按式(1)计算,饱和度按式(2)计算:

$$v = \frac{Q}{AT} \quad (1)$$

其中: Q 为渗流出水量; A 为试样的横截面积; T 为渗流的时间。

$$S_r = \frac{\omega G_s}{e} \quad (2)$$

其中: ω 为试样的含水量; G_s 为垃圾的比重; e 为试样的孔隙比;孔隙比按式(3)计算:

$$e = \frac{G_s \rho_w (1 + \omega)}{\rho} - 1 \quad (3)$$

其中: ρ 为试样的密度; ρ_w 为 4 °C 时水的密度。

待试样完全饱和后,采用常水头试验方法,按试验技术规程进行渗透试验。 0.5 g/cm^3 密度试样试验结束后,按上述相同试验方法,分别对天然密度 0.6 、 0.7 、 0.8 、 0.9 、 1.0 、 1.1 g/cm^3 的垃圾试样进行渗透试验,对于天然密度 $\rho = 1.1 \text{ g/cm}^3$ 的垃圾试样进行长期的渗透试验。

3 试验结果及分析

3.1 渗透速率与饱和度的关系

对 3 种配比、初始密度为 0.5 g/cm^3 的生活垃圾试样,进行了渗透速率 v 与饱和度 S_r 关系渗透试验,根据试验方法设定,分别取试样 3 分钟前后的饱和度均值与渗透速率均值,对渗透速率与饱和度进行分析,结果见图 5。从图 5 可看出,随着新鲜生活垃圾饱和度的增加,渗透速率也在逐渐增加,其关系可以拟合为多项式形式,见式(4),拟合系数均超过 0.99。从图 5 还可看出,虽然试验点有一定的离散性,渗透速率的总体趋势向上,试样 1 渗透速率大于试样 2 大于试样 3。图 5 表明,饱和新鲜生活垃圾的渗透速率在 10^{-2} cm/s 量级左右。

$$v = aS_r + bS_r^2 \quad (4)$$

其中: a 、 b 为系数。拟合多项式的系数及拟合系数见表 2。

表2 不同配比试样渗透速率与饱和度拟合多项式的系数及拟合系数

不同配比试样	1	2	3
系数 a	3.13	5.04	2.02
系数 b	-0.014	-0.026	-0.009
拟合系数 R^2	0.9956	0.9915	0.9984

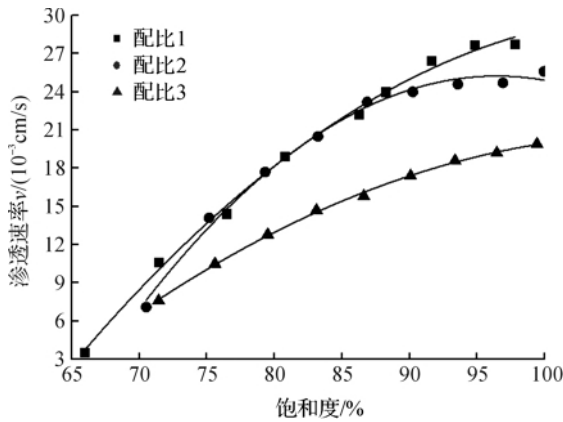


图 5 新鲜垃圾渗透速率与饱和度的关系

3.2 渗透速率与初始密度的关系

渗透速率 v 与初始密度 ρ 的关系曲线见图 6。从图 6 可看出,随着初始密度的增加,新鲜垃圾的渗透速率在减小,其关系可拟合为直线,拟合系数均大于 0.96,见式(5):

$$v = c\rho + d \quad (5)$$

其中: c 、 d 为系数。多项式系数及拟合系数见表 3。从图 6 还可看出,新鲜垃圾的配合比对渗透速率有一定的影响,但影响范围有限,原因可能是垃圾的渗透速率主要与渗流通道有关,即主要与垃圾的孔隙比或初始密度有关,无论是有机物还是无机物,只要渗流通道的断面一样,则渗透速率基本相同,所以对于新鲜垃圾,其配合比影响不大,但随着时间增加,垃圾中的有机物随着时间而发生降解,则其孔隙比会相应发生变化,有可能垃圾的渗透速率也会发生变化。图 6 表明,对于初始密度大于 0.9 g/cm^3 的新鲜生活垃圾,渗透速率在 10^{-3} cm/s 量级,小于 0.9 g/cm^3 的新鲜生活垃圾,渗透速率在 10^{-2} cm/s 。

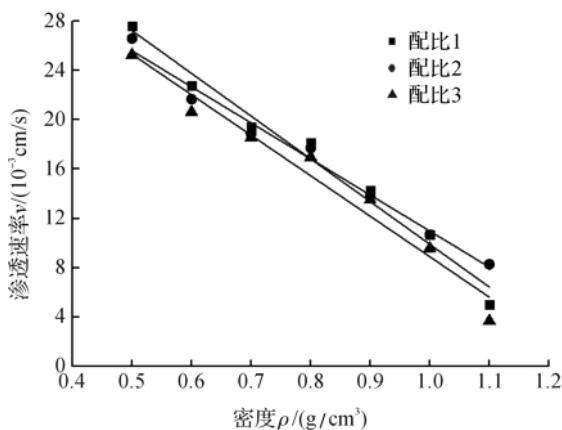


图 6 新鲜生活垃圾渗透速率与初始密度的关系

表 3 不同配比试样渗透速率与密度多项式系数及拟合系数

不同配比试样	1	2	3
系数 c	-34.64	-29.27	-32.55
系数 d	44.55	40.24	41.54
拟合系数 R^2	0.9753	0.9819	0.9640

3.3 渗透系数与相关试验结果比较

假设上述 3 种配比渗透试验符合达西渗透定律^[21],渗透系数按式(6)计算:

$$k = v/i \quad (6)$$

其中: i 为水力梯度。则渗透系数 k 与密度 ρ 的关系见图 7。从图 7 可以看出,3 种配比新鲜生活垃圾试样均有同样的规律,即随着初始密度的增加,其渗透系数逐渐减小,其关系可拟合为一条直线,拟合系数均大于 0.96,见式(7):

$$k = h\rho + n \quad (7)$$

其中: h 、 n 为系数。直线方程的系数及拟合系数见表 4。

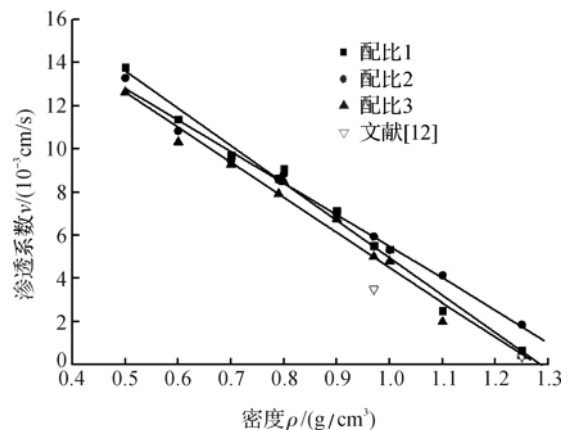


图 7 新鲜生活垃圾渗透系数与初始密度的关系

表 4 不同配比试样渗透系数与密度直线方程的系数及拟合系数

不同配比试样	1	2	3
系数 h	-18.7	-15.8	-17.5
系数 n	22.7	20.5	21.1
拟合系数 R^2	0.9728	0.9849	0.9604

为便于比较,本文将张文杰等^[12]在苏州七子山垃圾填埋场取样得到的渗透系数描绘到图 7 中,本文结果与文献[12]结果的对比见表 5。

表 5 本文结果与文献[12]结果对比

密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	试样 1 渗透系数 $k/(\text{cm/s})$	试样 2 渗透系数 $k/(\text{cm/s})$	试样 3 渗透系数 $k/(\text{cm/s})$	文献[12] 渗透系数 $k/(\text{cm/s})$
0.79	7.93×10^{-3}	8.02×10^{-3}	7.28×10^{-3}	4.81×10^{-2}
0.97	4.56×10^{-3}	5.17×10^{-3}	4.13×10^{-3}	3.50×10^{-3}
1.25	9.32×10^{-4}	7.6×10^{-4}	9.23×10^{-4}	3.6×10^{-4}

由图7、表5结合式(7)可知:a)密度 $\rho=0.79\text{ g/cm}^3$ 的垃圾试样,本文配比1垃圾试样的渗透系数与张文杰等^[12]得到的渗透系数差一个量级。b)密度 $\rho=0.97\text{ g/cm}^3$ 的垃圾试样,本文3个配比垃圾试样的渗透系数与张文杰等^[12]得到的渗透系数量级相同,均为 10^{-3} cm/s 量级,但本文的试验结果偏大约为1.3倍。c)密度 $\rho=1.25\text{ g/cm}^3$ 的垃圾试样,本文3个配比垃圾试样的渗透系数与张文杰等^[12]得到的渗透系数量级相同,均为 10^{-4} cm/s 量级,但本文的试验结果偏大约2倍左右。通过比较可知,虽然不同地域、不同配比垃圾的渗透系数的数值大小有不同,但相同密度垃圾渗透系数的量级相同,这说明垃圾渗透系数的大小主要取决于垃圾的密度,也即垃圾的密度是垃圾渗透特性的主要影响因素,这也间接说明了利用式(7)预测垃圾的渗透系数具有一定的参考价值。

为了进一步说明式(7)的适用范围和适用性,本文选取已发表文献中部分填埋场现场垃圾渗透试验结果进行比较,结果见图8。从图8可以看出,填埋场现场垃圾渗透系数的量级范围在 $10^{-4}\sim 10^{-2}\text{ cm/s}$ 之间,其大小主要与垃圾的填埋深度及埋龄有关,填埋深度越大,埋龄越长,其渗透系数越小。通过图8所列文献可知,填埋场浅层垃圾的渗透系数较大,量级一般为 10^{-3} cm/s ;填埋场深层垃圾的渗透系数较小,一般在 10^{-4} cm/s 量级,如陈云敏等^[19]、詹良通等^[22]对苏州七子山填埋场15.5~17.6m深层垃圾进行了抽水试验,得到的渗透系数为 $2.4\times 10^{-4}\sim 5.5\times 10^{-4}\text{ cm/s}$,这比本文初始密度大于 0.9 g/cm^3 新鲜生活垃圾的渗透系数(10^{-3} cm/s)小一个量

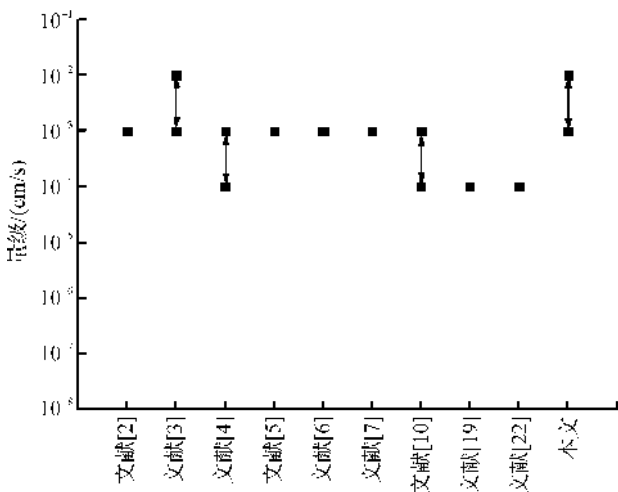


图8 不同文献填埋场现场垃圾渗透系数与本文试验结果

级,这从另一个侧面说明了式(7)不适用于预测填埋场深层垃圾的渗透系数,但对于预测填埋场浅层垃圾的渗透系数具有一定的参考价值。

3.4 垃圾渗透系数与时间的关系

对3种配比、初始密度 $\rho=1.1\text{ g/cm}^3$ 的垃圾试样,进行了垃圾的长期渗透试验。试验过程中同时进行了长期的沉降观测,垃圾试样的沉降量 s 与时间 t 的关系见图9。从图9可以看出,随着时间的延长,垃圾试样的高度逐渐减小,减小的趋势逐渐变缓;垃圾试样的沉降量随时间逐渐增大,增大的趋势逐渐变缓,130 d的沉降量大约为1 cm。从图9来看,垃圾的高度减小,这说明垃圾的密度有所增大,其原因可能是,随着时间的延长,垃圾中的可降解有机物发生了降解,产生了新的孔隙,在垃圾本身自重作用下孔隙被压缩,垃圾的体积随之减小,密度增大。假定试验符合达西渗透定律,渗透系数 k 与时间 t 的关系见图10。从图10可以看出,垃圾试样在初始7 d内的渗透系数变化较大,减小趋势比较明显;7 d后,呈现逐渐减小的趋势。其主要原因可能是垃圾中的有机物如纺织品等的浸水湿陷作用及有机物的降解作用,导致垃圾的密度增大,渗透系数减小。随着时间的延长,垃圾的浸水湿陷及降解作用减弱,垃圾的密度增长缓慢,垃圾的渗透系数减小缓慢。98 d后,试样1渗透系数出现微弱上扬趋势,试样3渗透系数则出现比较明显的下降趋势。

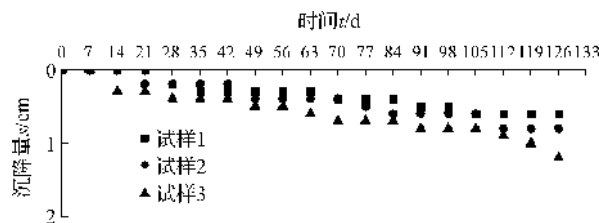


图9 垃圾试样的高度(沉降量)与时间的关系

对图10中3种配比生活垃圾试样试验结果进行拟合,渗透系数与时间的关系符合指数模型,见式(8),拟合系数均为0.8。

$$k = k_0 (\alpha + e^{\beta(1+t)}) \quad (8)$$

其中: k 为 t 时间垃圾的渗透系数, k_0 为垃圾的初始饱和渗透系数, α 、 β 为模型参数, t 为时间。模型参数及拟合系数见表6。

表6 不同配比试样渗透系数与时间指数模型的系数及拟合系数

不同配比试样	1	2	3
参数 α	0.752	-0.16	2.5
参数 β	0.906	-0.37	4.14
拟合系数 R^2	0.80	0.80	0.80

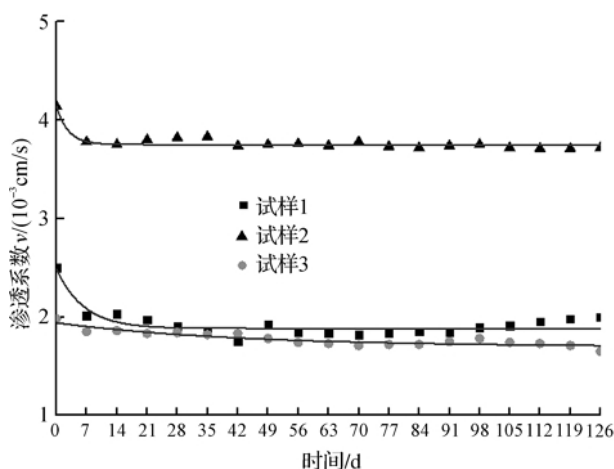


图10 生活垃圾渗透系数与时间的关系

4 结 论

采用大型渗透模型槽试验仪器,对不同配比、不同初始密度的新鲜垃圾试样进行了渗透试验,结论如下:

a)新鲜生活垃圾的渗透速率随饱和度的增大逐渐增大,渗透速率与饱和度的关系可拟合为多项式,拟合系数大于0.99,建立了多项式表达式。

b)新鲜生活垃圾的渗透速率随初始密度的增大而逐渐减小,其规律可拟合为一条直线,拟合系数大于0.96,建立了渗透速率与初始密度的直线关系表达式。

c)建立了生活垃圾渗透系数与初始密度的直线关系表达式,利用该公式,可以大致预测新近填埋生活垃圾的渗透系数。

d)对3种配比、初始密度 $\rho=1.1\text{ g/cm}^3$ 的新鲜生活垃圾试样,进行了长期渗透试验,其渗透系数与时间的关系可拟合为指数模型,拟合系数为0.8,建立了指数模型表达式。

e)得到了3种配比、7种初始密度新鲜生活垃圾渗透系数的变化范围,渗透系数的量级范围在 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{ cm/s}$ 之间。

参考文献:

[1] 钱学德,郭志平.城市固体废弃物(MSW)的工程性质[J].岩土工程学报,1998,20(5):1-6.
[2] OWEIS I S, SMITH D A, ELLWOOD R B, et al. Hydraulic characteristics of municipal refuse [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(4): 539-553.
[3] LANDVA A O, CLARK J I. Geotechnics of waste fill

[C]// Proceedings of Canadian Geotechnical Conference. Geotechnical Testing of Waste Fill: Theory and Practice. Pittsburgh: ASTM Special Technical Publication, 1990: 86-103.
[4] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea[J]. Waste Management, 2002, 20: 261 - 267.
[5] SHANK K L. Determination of hydraulic conductivity of the Alachua County Southwest Landfill[D]. Florida: University of Florida, 1993: 34-45.
[6] 钱学德,郭志平.美国的现代卫生填埋工程[J].水利水电科技进展,1995,15(6):27-31.
[7] KORFIATIS G P, DEMETRACOPOULOS A C, NAWYE G. Moisture transport in a solid waste column [J]. Journal of Environmental Engineering, 1984, 110(4): 780-796.
[8] POWRIE W, BEAVEN R P. Hydraulic properties of household waste and implications for landfills [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1999, 137(4): 235-247.
[9] DURMUSOGLU E, SANCHEZ I M, CORAPCIOGLU M Y. Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples [J]. Environmental Geology, 2006, 50(6): 773-786.
[10] REDDY K R, HETTIARACHCHI H, PARAKALLA N, et al. Hydraulic conductivity of MSW in landfills [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(8): 677-683.
[11] ZHANG Z Y, WU D Z, ZHANG L F, et al. Study on the permeability and the permeable mechanism of the municipal solid waste [J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2014, 32(3): 1517-1524.
[12] 张文杰,陈云敏,邱战洪.垃圾土渗透性和持水性的试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3313-3323.
[13] 介玉新,旦增顿珠,魏弋峰.垃圾土的渗透特性试验[J].岩土工程技术,2005,19(6):307-310.
[14] 瞿贤,何晶晶,邵立明,等.城市生活垃圾渗透系数测试研究[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(12):13-17.
[15] 刘钊.填埋垃圾渗透特性测试及抽排竖井渗流分析[D].杭州:浙江大学,2010:38-78.
[16] 柯瀚,王文芳,魏长春,等.填埋体饱和渗透系数影响因素室内研究[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(7): 1164-1171.
[17] 邱战洪,何春木,朱兵见,等.不同降雨模式下山谷型垃圾填埋场水分运移及其稳定性研究[J].岩土力学,

- 2012, 33(10): 3151-3170.
- [18] 王文芳. 不同降解龄期下城市固体废弃物渗透性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 47-64.
- [19] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场渗沥液水位壅高及工程控制[J], 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 154-163.
- [20] 张振营, 严立俊, 吴大志. 城市新鲜垃圾抗剪强度参数模型研究[J], 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1938-1944.
- [21] 松冈元, 罗汀, 姚仰平. 土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 32-33.
- [22] 詹良通, 徐辉, 兰吉武, 等. 填埋垃圾渗透特性室内外测试研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(3): 478-486.

Experimental Study on Permeability of Fresh Municipal Solid Waste with Different Mixed Proportion

ZHANG Zhenying, ZHANG Lingfeng, WU Dazhi, DING Zhengkun, LEI Shanshan, WANG Yingfeng
(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Indoor model slot test was done for fresh municipal solid waste (MSW) with 3 kinds of proportions by using a large-scale permeability model slot test apparatus in the geo-environmental laboratory. Seven different initial densities (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 g/cm³) were selected to study permeability characteristics and rules of fresh municipal solid waste by constant head test. The test results show that: permeation rate of fresh municipal solid waste increases with the increase in the saturation degree of the fresh MSW, and the relationship can be formulated to be a polynomial function, with the fitting coefficients greater than 0.99. Multiterm expression was established. Permeation rate decreases gradually with the increase in the initial density of the fresh MSW, and the relationship can be formulated as a linear line, with the fitting coefficients greater than 0.96. Line relationship expression was established. Relationship between permeability coefficient of MSW and time can be formulated to be an exponential model, and the fitting coefficient is about 0.80. Exponential model expression was set up. The range of the permeability coefficient of the fresh MSW is obtained, which ranges from 10⁻³ cm/s to 10⁻² cm/s. The conclusions can provide a reference for the seepage analysis of a landfill.

Key words: soil mechanics; fresh municipal solid waste; large-scale permeability model slot; constant head test method; permeability characteristics; exponential model

(责任编辑: 康 锋)