

城市固体废弃物持水特性的室内试验

刘晓东^{1 2} 施建勇^{1 2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 :为了对城市固体废弃物的持水特性进行分析,采用非饱和固结仪对 6 组人工配制的城市固体废弃物试样进行了土水特征曲线测定的室内试验,同时还采用滤纸法量测试样的土水特征曲线,并对试样孔隙大小分布指标 λ 进行了分析。试验结果表明,试样的进气值很低,为 1 kPa 左右,荷载作用使用进气值升高; λ 值随着试样初始孔隙比的增加而减小,随着试样有机物质量分数的增加而增加,使用滤纸法测城市固体废弃物的土水特征曲线时,高吸力阶段的值更加合理,更有参考性。

关键词 城市固体废弃物;持水特性;土水特征曲线;进气值;非饱和固结仪法;滤纸法

中图分类号 :X705 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)01-0034-05

Laboratory tests on hydraulic properties of municipal solid waste//LIU Xiao-dong^{1 2}, SHI Jian-yong^{1 2}(1. Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :In order to analyze the hydraulic properties of municipal solid waste (MSW), laboratory tests on the soil-water characteristic curves of 6 groups of MSW samples with different void ratios and organic contents are performed by means of the unsaturated consolidation apparatus. The filter paper method is also employed to determine their soil-water characteristic curves. The distribution index λ of void size of the samples is analyzed. The results show that the air-entry value of the MSW samples is very small and about 1 kPa, and it increases owing to the action of loading. The value of λ decreases with the increase of the initial void ratio and increases with the increase of the organic content in the samples. For measuring the soil-water characteristic curves of MSW by means of the filter paper method, the values at high suction phase are more rational and significant.

Key words :municipal solid waste; hydraulic property; soil-water characteristic curve; air-entry value; unsaturated consolidation apparatus method; filter paper method

城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)收集时是非饱和的,填埋后也处于非饱和状态^[1],与土不同,MSW 为大孔隙介质,大尺寸组分含量较多,孔隙中含有大量的水和气,研究 MSW 的持水特性对于深入了解其非饱和特性具有十分重要的意义。MSW 的持水特性可由土水特征曲线表示,它反映了 MSW 基质吸力与含水率的关系。确定 MSW 的持水特性能为填埋场垃圾渗滤液动态传输过程的预测提供依据,还能为填埋场中水、气运移分析提供重要参数,尤其 MSW 的非饱和和渗透系数直接测试较困难,通过 MSW 的持水特性可以间接得到其非饱和和渗透系数。目前关于 MSW 的持水特性研究文献比较少, Holmes^[2]发现,随着垃圾中有机物的减少,MSW 的持水率降低;Jang 等^[3]通过改进的 Temple 仪测量垃

圾的土水特征曲线,分析了 MSW 的压实度对土水特征曲线的影响;Fungaroli 等^[4]指出持水率随着 MSW 粒径的减小而减小;魏海云^[5]通过压力板仪和 Temple 仪对杭州市 MSW 的土水特征曲线进行了测试,研究了其组分和初始孔隙比对土水特征曲线的影响;张文杰等^[6]用压力板仪测定了苏州七子山填埋场中 MSW 试样的土水特征曲线,得到了 MSW 持水特性随填埋深度的关系曲线。

本文采用非饱和固结仪进行 MSW 的持水特性试验。使用非饱和固结仪一方面可以量测 MSW 的持水特性在较大吸力范围内的变化,另一方面在试验过程中可以较精确地量测试样的体变,从而获得饱和度 S 和孔隙率 n 随吸力的变化关系,为进一步分析 MSW 的非饱和特性参数提供依据。通过对

6 组人工配制的 MSW 试样进行持水特性的对比试验 ,研究了初始孔隙比、有机物质量分数和荷载作用对 MSW 土水特征曲线的影响 ;同时还采用滤纸法进行 MSW 试样的土水特征曲线量测 ,并与用非饱和固结仪法得到的土水特征曲线进行了对比。

1 试样的选择

为了分析不同有机物质量分数、不同初始孔隙比与荷载作用对 MSW 土水特征曲线的影响 ,采用人工配制的 MSW 试样 ,利用非饱和固结仪进行了 6 组土水特征曲线测试试验 ,6 组试验控制条件见表 1 ,不同试样的组成见表 2。使用滤纸法进行 MSW 试样的土水特征曲线量测时所用试样为 S2 和 S6。

表 1 对比试验控制条件

试样 编号	有机物质量 分数 $w/\%$	初始 孔隙比 e	气压范围/ kPa	试验方法
S1	60	1.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法
S2	60	1.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法、滤纸法
S3	60	2.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法
S4	60	3.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法
S5	30	1.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法
S6	15	1.5	0 ~ 400	非饱和固结仪法、滤纸法

注 S1 试样饱和后加载 50 kPa。

表 2 不同试样的组成(干质量分数) %

试样 编号	有机物					无机物	
	厨余	纸	木屑	橡塑	布料	土	玻璃
S2	25.00	15.00	5.00	10.00	5.00	35.00	5.00
S5	12.50	7.50	2.50	50.00	2.50	61.25	8.75
S6	6.25	3.75	1.25	2.50	1.25	74.40	10.60

2 试验方法与步骤

2.1 非饱和固结仪法

采用 1.5 MPa 非饱和固结仪 ,测试方法为 :对仪器密闭的压力室施加气压力 ,气压力将 MSW 试样中的孔隙水排出 ,试样放置在陶土板上 ,陶土板只允许水通过(自由气体不能通过) ,同时压力室与橡胶排水管相连 ,橡胶排水管与量管相连 ,保证试验过程中试样中的孔隙水压力为 0 kPa ,这样试验平衡时试样的吸力即为该级气压力。逐级增加气压力 ,计算每级气压力下的含水率(本文含水率均为体积含水率) ,最后即可得到 MSW 的土水特征曲线。

非饱和固结仪法量测的具体步骤为 :①将配制好的试样压入环刀(直径 61.8 mm ,高 40 mm) ,所配的试样最大粒径尺寸控制在环刀直径的 1/10 以内 ,并按照规范要求^[7]进行抽气饱和 ,抽气饱和后将试样放入水中浸泡 24 h 后取出即可进行试验 ;②将饱和的 MSW 试样放在压力室的陶土板上 ,陶土板要事先饱和 ,试样顶部放置一滤石 ,安装仪器的其他部件

并确保仪器的密闭性 ;③对仪器压力室分级施加气压力 ,在每一级气压力作用下排水稳定时 ,读取量管里的水量变化 ,排水稳定标准为 :在 2 h 内 MSW 试样的排水量小于 0.012 mL ;④施加最后一级气压力 ,待排水稳定后 ,读取量筒读数 ,释放压力室中的气压力 ,将试样取出称量试样的质量 ,然后放入烘箱烘干(60℃烘干 48 h)得到试样的干质量 ,以此得出试样最终的含水率 ;⑤根据此含水率及之前每一级气压力下的排水量的变化 ,反算出前面各级气压力下的含水率 ,最后根据气压力与含水率的关系 ,绘制 MSW 的土水特征曲线。

2.2 滤纸法

滤纸法是建立在滤纸能够同具有一定吸力的土达到平衡(在水分流动意义上)的假设基础上的。通过让已知率定曲线的滤纸与土样接触 ,使得土与滤纸水分充分交换从而达到平衡后 ,可以认为土体吸力与滤纸吸力近似相等 ,从而通过滤纸含水率与率定曲线公式可以换算出相当于土样中的基质吸力值。滤纸法的优点是可以测量全吸力范围(0 ~ 10 000 kPa)内的曲线^[8]。

同一商标的滤纸被认为具有同样的率定曲线。试验采用 Whatman No.42 型无灰滤纸 ,直径为 70 mm (未裁剪) ,其率定公式^[9]为

$$\lg \psi = \begin{cases} 4.84 - 0.0622 w_f & w_f \leq 47\% \\ 6.05 - 2.48 \lg w_f & w_f > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

式中 : ψ 为吸力 ,kPa ; w_f 为含水率 ,%。

滤纸法量测的具体步骤为 :①将配制好并饱和后的 S2 和 S6 试样置于大气中或在烘箱中烘干 ,至某一设计的含水率 ,取 2 块土样 ,将 3 张烘干后的滤纸置于两土样之间 ,并使滤纸与土样接触良好 ,接触处用胶带缠好密封 ,然后用保鲜膜将其密封包好 ;②将封装好的试样静置 10 d ;③取下保鲜膜 ,称量中间一层滤纸和土样的质量 ,据此计算含水率 ,要保证在 30 s 内完成 ,避免水分蒸发引起的误差 ;④根据滤纸的含水率 ,结合已知的滤纸率定公式(式(1)) ,得到试样的吸力值 ,根据此吸力值及对应的试样含水率 ,绘制出 MSW 试样的土水特征曲线。

3 试验结果与分析

3.1 MSW 试样与一般土体的持水特性对比

图 1 为本文 MSW 试样和一般土体的土水特征曲线。由土水特征曲线可以得到土的进气值 ϕ_b 、残余含水率 θ_r 与和饱和含水率 θ_s 3 个参数。其中 ϕ_b 是指空气进入土孔隙所必须达到的基质吸力值 ,它是土中最大孔隙尺寸的一种度量 ; θ_r 是基质吸力的增加并不引起含水率的显著变化时的含水率 ,即土

水特征曲线变化稳定阶段对应的含水率^[8]; θ_s 为土水特征曲线上基质吸力为 0 kPa 时对应的含水率。

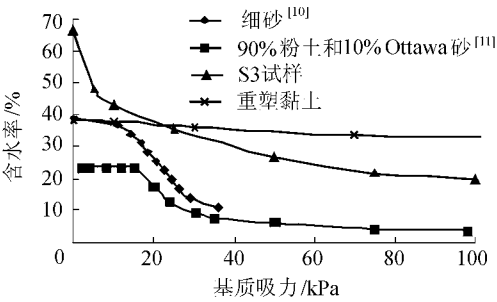


图1 MSW 试样与一般土体的土水特征曲线对比

由图 1 可以看出,MSW 试样的含水率从低基质吸力开始就迅速下降,普通土体(细砂、粉土)的含水率从低基质吸力开始有一个几乎稳定不变的过程,随着基质吸力的增加,当达到某一吸力值后,其含水率才开始逐渐下降,最终趋于稳定,整个土水特征变化规律呈“S”形,突变点对应的吸力值即为进气值。由图 1 可以看出,MSW 试样的进气值非常小,接近 0 kPa,Gonzalez 等^[10]试验细砂的进气值约为 10 kPa,Fredlund 等^[11]试样中粉土和砂混合物的进气值约为 15 kPa。试验中还进行了重塑黏土的土水特征曲线测量,从图 1 可以看出重塑黏土进气值最大,在试验吸力范围内没有出现突变点。但是 MSW 试样的饱和含水率和残余含水率与普通土体相比都较高,这主要是由于 MSW 试样含有大量的有机质,与普通土颗粒相比,有机质具有良好的保水和持水能力。

3.2 初始孔隙比对 MSW 试样土水特征曲线的影响

图 2 为有机物质量分数相同($w = 60\%$)、初始孔隙比不同的 MSW 试样的土水特征曲线。由图 2 可以看出,对于有机物质量分数相同的 MSW 试样,随着初始孔隙比的逐渐增大,试样的 θ_s 也逐渐增加, θ_r 却逐渐减小。这主要是由于初始孔隙比越大,饱和状态下孔隙中能保留的水分就越多,从而导致 θ_s 逐渐增大,MSW 试样在 $e = 3.5$ 时, $\theta_s = 73.13\%$,当 $e = 1.5$ 时, $\theta_s = 59.12\%$;另一方面,随着初始孔隙比的增大, θ_r 逐渐减小,其实 θ_r 的大小主要受 MSW 中结合水的影响,但是对于有机物质量分

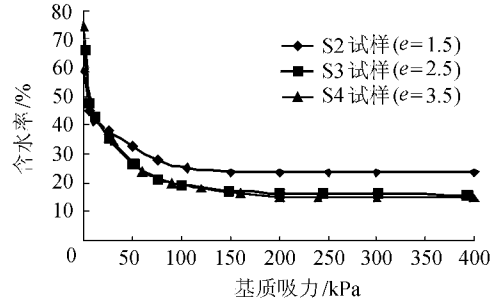


图2 不同初始孔隙比条件下试样的土水特征曲线

数相同的 MSW 而言,孔隙比越大,颗粒间胶结越疏松,在高压力的作用下,水更容易被排出,从而也会导致残余含水率有相应的减小。由图 2 还可以看出,MSW 试样在 $e = 3.5$ 时, $\theta_r = 14.88\%$,当 $e = 1.5$ 时, $\theta_r = 23.47\%$ 。

为更清晰显示 MSW 试样在低吸力阶段的持水特性,将图 2 中基质吸力为 0 ~ 50 kPa 土水特征曲线放大如图 3 所示。由图 3 可以看出,孔隙率越大,其低基质吸力下的曲线越陡,这主要是由于大孔隙会导致排水更快,所以曲线更陡,另外 3 条曲线交于一点,在交点之前,初始孔隙比越大,相同的吸力对应的含水率越高,交点之后,初始孔隙比越大,相同吸力对应的含水率越小。

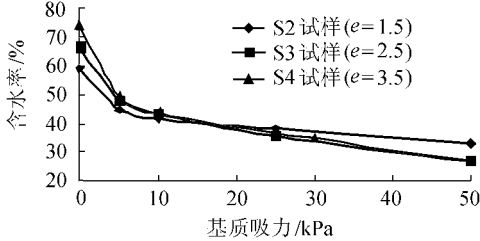


图3 不同初始孔隙比条件下试样在低吸力阶段的土水特征曲线

随着初始孔隙比的逐渐增大,MSW 的 θ_r 逐渐减小,这与侯长亮等^[12]得到的规律一致,与魏海云^[5]试验得到的“初始孔隙比越大,垃圾的残余含水率越大”的规律相反。魏海云^[5]试验试样配制过程中包含大量的菜叶和骨肉,这些物质的持水能力很强,在一定的基质吸力试验范围内,保持在这些物质中的水分无法排出,从而导致其残余含水率较高。由此可见,使用不同成分配制出的 MSW 试样会得到不同的持水特性。

3.3 有机物质量分数对 MSW 土水特征曲线的影响

图 4 为初始孔隙比($e = 1.5$)相同、有机物质量分数不同的 MSW 试样的土水特征曲线。由图 4 可以看出,各组 MSW 试样的 θ_s 几乎相同,都在 60% 左右,说明与初始孔隙比相比,有机物质量分数对于 θ_s 的影响很小。随着 MSW 中有机物质量分数的减小,其 θ_r 也越来越小,这主要是由于有机物质量分数越小,MSW 中无机物成分渣土(细粒成分)的含量

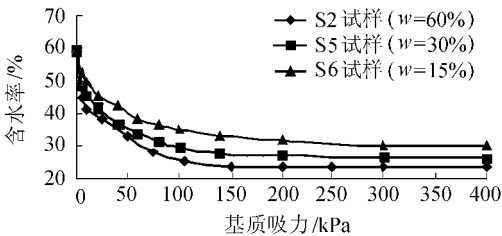


图4 不同有机物质量分数条件下试样的土水特征曲线

越高,由于渣土的颗粒细小,且含有一定量的有机成分,所以增加了垃圾的持水能力。

将图4中低吸力阶段(0~50 kPa)的土水特征曲线放大,得到图5所示的土水特征曲线。由图5可以看出,有机物质质量分数越低,其低基质吸力阶段的曲线越陡,这主要是由于相同初始孔隙比的条件下,有机物质质量分数越低,其大孔隙越多,排水越快,所以曲线越陡;与图3土水特征曲线不同,图5的土水特征曲线没有交点,从试验一开始,相同吸力的条件下,有机物质质量分数高的试样就对应小的含水率。

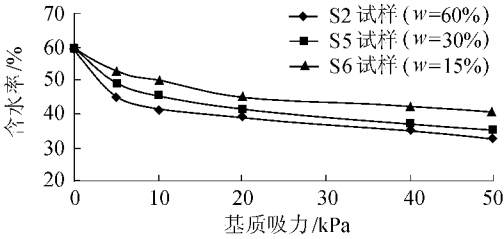


图5 不同有机物质质量分数条件下试样在低吸力阶段的土水特征曲线

随着有机物质质量分数的逐渐增大,MSW的 θ_r 逐渐减小,这与侯长亮等^[12]得到的规律一致,与魏海云^[5]试验得到的“有机物质质量分数越高,垃圾的 θ_r 越大”的规律相反。魏海云^[5]试验的对比试样中有机物质质量分数和初始孔隙比都不同,两个试样的有机物质质量分数分别为51.9%和17.1%,初始孔隙比分别为3.2和2.3,因此无法确定高的 θ_r 就是由有机物质质量分数影响的,也可能受到初始孔隙比不同的影响。另外魏海云^[5]还做了一组初始孔隙比相同但有机物质质量分数不同的对比试验,试验中魏海云选择40 kPa和10 kPa吸力对应的含水率作为试样的残余含水率,而在此吸力作用下,试样的含水率并没有稳定,若是选择稳定时的含水率作为试样的残余含水率,那么魏海云的试验反映的规律就和本文试验反映的规律相同。

3.4 荷载作用对MSW土水特征曲线的影响

图6为相同有机物质质量分数、相同初始孔隙比条件下,荷载作用对MSW试样土水特征曲线的影响。试样都是先饱和后再加载或不加载。从图6可以看出,无荷载作用时,MSW在低气压力阶段的曲

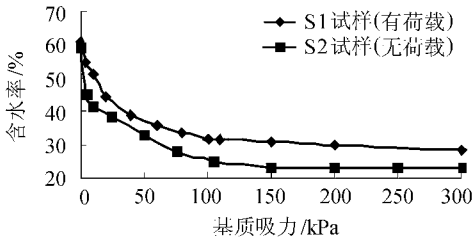
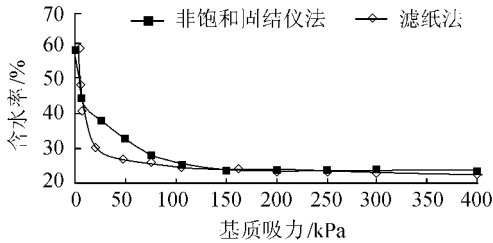


图6 荷载作用对试样土水特征曲线的影响

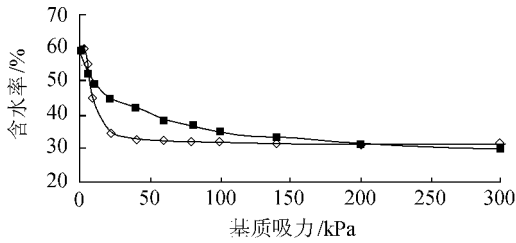
线更陡,其残余含水率也更低,这主要是由于MSW在荷载作用下,孔隙变得更加细小,持水能力增强,导致排水更加困难。

3.5 非饱和固结仪法与滤纸法的对比

对S2和S6试样用滤纸法进行了土水特征曲线的量测,非饱和固结仪法与滤纸法的试验结果如图7所示。



(a) S2试样



(b) S6试样

图7 非饱和固结仪法和滤纸法试验结果对比

从图7可以看出,使用滤纸法和非饱和固结仪法测得的土水特征曲线总趋势是相同的,但是在低吸力下两种方法得到的吸力值差别较大,相差10%~35%,即在相同含水率下,使用非饱和固结仪法得到的吸力值比使用滤纸法得到的吸力值要大,且土水特征曲线的变化更加平缓,而在高吸力阶段,两种方法得到的结果差别不大。产生这种现象的原因,一方面由于滤纸本身都是在高吸力下率定的,使用在低吸力阶段时会出现误差;另一方面试验过程中滤纸被剪裁成与土样的直径相同,在吸力平衡过程中,会有少量水分凝结在保鲜膜上,当吸力平衡结束拆除保鲜膜时,凝结的水珠可能会滑落到土样间的滤纸上,造成滤纸再次吸水,而滤纸对吸水很敏感,即使是少量的水进入滤纸,也会增加其含水率,导致吸力降低,试样的含水率越高,凝结在保鲜膜上的水珠越多,这种现象也就越明显,而在低含水率时,凝结的水珠很少甚至没有,所以得到的结果和非饱和固结仪法得到的结果比较相近。因此用滤纸法测MSW的土水特征曲线时,高吸力阶段的值更加合理,更有参考性,低吸力段(小于100 kPa)不建议使用滤纸法。

4 MSW的孔隙大小分布指标分析

孔隙大小分布指标 λ 是一个表示孔径分布特征

的常数 λ 越小,表示孔隙尺寸分布越不均匀,它对于预测非饱和土的渗透性等特性具有十分重要的意义。

Brooks 等^[13]在用各类介质做了大量脱湿试验的基础上提出了 Brooks-Corey 公式:

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

式中: S_e 为有效饱和度; ψ 为 MSW 的基质吸力; θ 为含水率。

对式(2)两边同时取自然对数并整理得

$$\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = -\lambda \ln \psi + \lambda \ln \psi_b \quad (3)$$

由式(3)可以看出,若将 $\ln \psi$ 看作自变量, $\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

看作因变量,那么 $-\lambda$ 即为由 $\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 和 $\ln \psi$ 确定的直线的斜率, $\lambda \ln \psi_b$ 即为直线的截距。

按照式(3)对得到的 6 组试样数据进行整理,结果见表 3。由表 3 可以看出,MSW 试样的进气值很小,都在 1 kPa 左右;随着初始孔隙比的增加,MSW 试样的进气值也在逐渐减小,这主要是由于大孔隙使得气体的进入更容易,有机物质量分数越低,MSW 试样的进气值也越低,这主要是由于有机物质量分数越低,在相同初始孔隙比的条件下,大孔隙含量越大,从而使得气体的进入也更容易;荷载作用使得 MSW 试样的进气值增加,S1 试样的进气值为 4.58 kPa,远大于没有荷载作用的 MSW 试样的进气值,说明荷载使得 MSW 的孔隙变小,透气更加困难;总体上各试样的 λ 值都比较接近,在 0.27~0.47 之间,张文杰等^[6]得到的 λ 值为 0.37, λ 值都非常小,这也说明了 MSW 的不均匀性。以上结果同时也验证了前文所述的不同试样持水特性的合理性。

表 3 土水特征拟合直线结果

试样编号	λ	ψ_b/kPa
S1	0.47085	4.58
S2	0.39908	1.34
S3	0.29437	1.05
S4	0.28910	1.03
S5	0.29163	1.05
S6	0.27203	1.04

由试验结果可以看出,随着初始孔隙比的增加, λ 值在减小,随着有机物质量分数的增加, λ 值也在增加。

5 结 论

a. 与普通土体相比,MSW 试样的进气值很低,定量验证表明在 1 kPa 左右,随着初始孔隙比的逐渐

增大,MSW 试样的饱和含水率也逐渐增加,残余含水率却逐渐减小,随着 MSW 试样中有机物质量分数的增加,其残余含水率越来越小,饱和含水率几乎不变,荷载作用使得 MSW 残余含水率也变大。

b. 用滤纸法测 MSW 的土水特征曲线时,低吸力阶段(0~100 kPa)时误差较大,高吸力阶段的值更加合理,更有参考性。

c. 孔隙大小分布指标 λ 值非常小,在 0.27~0.47 之间,表明了 MSW 的不均匀性, λ 值随着初始孔隙比的增加而减小,随着有机物质量分数的增加而增加。

参考文献:

[1] 钱学德,郭志平,施建勇,等.现代卫生填埋场的设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:159.

[2] HOLMES R. The absorptive capacity of domestic refuse from a full-scale, active landfill[J]. Waste Management, 1983, 73(11):581-586.

[3] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo Metropolitan Landfill in Korea[J]. Waste Management, 2002, 22(3):261-267.

[4] FUNGAROLI A A, STEINER R L. Investigation of sanitary landfill behavior[R]. Cincinnati, Ohio, U S: Environmental Protection Agency, 1979.

[5] 魏海云.城市生活垃圾填埋场气体运移规律研究[D].杭州:浙江大学,2007.

[6] 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.

[7] GBT50123—1999 土工试验方法标准[S].

[8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M].陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译.北京:中国建筑工业出版社,1997:157-163.

[9] CHANDLUR R I, GUTIERRET C I. The filter paper method of suction measurement[J]. Geotechnique, 1986, 36(2):265-268.

[10] GONZALEZ P A, ADAMS B J. Mine tailings disposal: laboratory characterization of tailings[R]. Toronto, Canada: Department Of Civil Engineering, University of Toronto, 1980:1-14.

[11] FREDLUND D G, WONG G H. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction[J]. ASTM Geotech J, 1989, 12(3):188-194.

[12] 侯长亮,赵颖.孔隙率及降解时间对垃圾土-水特征曲线影响的试验研究[J].武汉工业学院学报,2009,28(3):106-109.

[13] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[J]. Colorado State University, Hydro Paper, 1964(3):27.

(收稿日期:2011-05-05 编辑:熊水斌)