

垃圾土渗透性和持水性的试验研究

张文杰¹, 陈云敏², 邱战洪^{2,3}

(1. 上海大学 土木系, 上海 200072; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 3. 台州学院 建筑工程学院, 台州 318000)

摘要: 通过室内常水头试验测定了垃圾土的饱和渗透系数, 通过室内压力板仪试验测得垃圾土的土-水特征曲线。基于土-水特征曲线预测了垃圾土的非饱和渗透系数, 并通过室内入渗试验进行了初步验证。常水头试验得到深层、中层和浅层垃圾土的饱和渗透系数分别为 3.56×10^{-4} 、 3.50×10^{-3} 、 4.81×10^{-2} cm/s。土-水特征曲线试验表明, 垃圾土饱和含水率和残余含水率较高, 进气值很小, 土-水特征曲线在低基质吸力时存在陡降段, 其中浅层垃圾土的陡于深层垃圾。验证试验表明, 预测得到的非饱和渗透系数与实测结果接近, 基于土-水特征曲线预测垃圾土非饱和渗透系数的方法基本可行。

关键词: 垃圾土; 常水头试验; 土-水特征曲线试验; 渗透系数

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

Laboratory and field tests on hydraulic properties of landfilled waste

ZHANG Wen-jie¹, CHEN Yun-min², QIU Zhan-hong^{2,3}

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072 China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: Saturated hydraulic conductivity of landfilled waste was measured by laboratory tests. Soil-water characteristic curve (SWCC) of landfilled waste was measured using a ceramic plate extractor. A method to predict unsaturated hydraulic conductivity of landfilled waste based on its SWCC was proposed and was verified by a laboratory test. Saturated hydraulic conductivities of landfilled wastes in shallow, middle and deep depth of a landfill are measured to be 4.81×10^{-2} cm/s, 3.50×10^{-3} cm/s and 3.56×10^{-4} cm/s, respectively. The results of SWCC tests show that the saturated and residual water content of landfilled wastes are high and that the SWCC curve is steep when matric suction is relatively low. The unsaturated hydraulic conductivity predicted using the proposed method is verified by an infiltration test. The result illustrates the feasibility of the proposed method.

Key words: landfilled waste; constant head permeability test; SWCC test; hydraulic conductivity

1 引言

垃圾填埋场中的很多重要问题, 如渗滤液导排系统设计、渗滤液回灌方案设计、渗滤液渗漏分析、污染物扩散分析和垃圾堆体稳定分析, 都需要确定垃圾土的水力参数^[1]。垃圾土成分多变, 在空间分布上具非均质特性, 在时间上具可降解特性, 因此垃圾土的水力特性复杂, 其渗透系数可跨越好几个量级, 同时垃圾土是大孔隙介质, 并夹杂有细粒土和有机物, 因此, 其持水特性也不同于一般岩土工程中的土。

Qian 等^[1]通过降雨和渗滤液产量之间的关系反

算出垃圾土的渗透系数约为 10^{-3} cm/s; Chen 等^[2]、Jang 等^[3]进行了室内常水头试验; Owies 等^[4]通过现场抽水试验得到垃圾土饱和渗透系数约为 10^{-3} cm/s; Landva 等^[5]通过现场注水试验确定的渗透系数为 $10^{-3} \sim 3.9 \times 10^{-2}$ cm/s。瞿贤等^[6]通过室内常水头试验确定垃圾土的渗透系数在 10^{-3} cm/s 量级, 王洪涛等^[7]通过双套环入渗试验测得填埋场表层垃圾土的饱和渗透系数为 1.85×10^{-3} cm/s, 但这些研究均没有考虑垃圾土渗透系数的时间和空间变异性。对于垃圾土的持水特性, 国内外已进行了一定研究^[8-10], 但因为填埋场中部和底部的垃圾土取样难度大, 故已有的测试多是基于对垃圾成分的调查, 人工配制

新鲜垃圾土试样进行的, 新鲜样和现场样降解程度的差别将给试验造成误差。国外学者^[11-13]通过垃圾柱入渗试验来研究垃圾土的非饱和和渗透特性, 但试验设备及方法复杂, 耗时多且成本高, 在工程上不具实用性, 国内尚无这方面的研究。Fredlund 等^[14]、van Genuchten^[15]提出基于沿土-水特征曲线进行饱和和孔隙体积积分预测非饱和和渗透系数的方法, 他们的方法较适用于砂性土; Kazimoglu 等^[16]对比了垃圾土的试验结果与 van Genuchten 方法的预测结果, 发现含水率较低时预测和实测结果接近, 而含水率较高时差别较大, 说明这些方法不适用于垃圾土, 并指出预测误差源于垃圾土的大孔隙特性。

本文利用填埋场现场钻孔取得不同深度处的垃圾土试样, 在室内测得了其饱和渗透系数和土-水特征曲线, 提出基于土-水特征曲线预测垃圾土非饱和和渗透系数的方法, 并通过简单的室内入渗试验对预测结果进行了初步验证。

2 室内常水头试验

在苏州七子山填埋场现场钻孔取垃圾土试样, 密封保存。在实验室内分别选择深度为 3~8 m、14~16 m 和 24~28 m 的垃圾制样, 本文分别称之为浅层、中层和深层垃圾, 测得其相关指标和组分如表 1 所示。由表可见, 垃圾的各指标均与填埋龄期有关。随着填埋龄期增长, 垃圾中有机物含量减少, 渣土含量相应增加, 垃圾的相对密度增大, 密度增大, 同时垃圾埋深增加, 上覆压力增大, 垃圾孔隙比减小、密实度增加。

表 1 不同深度垃圾土样的相关指标

指标	浅层垃圾	中层垃圾	深层垃圾
埋深/m	3~8	14~16	24~28
龄期/a	3	6	10
天然密度/(g/cm ³)	0.79	0.97	1.25
孔隙比	2.7	2.2	1.60
相对密度	1.51	1.91	2.10
体积含水率/%	38.22	42.20	44.35
有机物含量/%	37.86	29.27	18.70
塑料含量/%	23.5	11.83	4.91
无机废品含量/%	3.28	1.18	1.10
纤维类含量/%	20.46	13.49	3.75
腐殖质含量/%	17.42	16.83	14.92
渣土含量/%	35.34	56.67	75.32

使用常水头法测定垃圾的饱和渗透系数, 自制试验装置如图 1 所示, 试样桶直径为 10 cm, 长度为 65 cm, 试样桶两端设有钢丝网和碎石过滤层, 与进水口和出水口相连。将垃圾土中大尺寸颗粒破

碎至直径小于 2 cm (避免大尺寸组分占有过大断面对试验结果造成较大影响), 拌和均匀, 装入试样桶内, 分层击实到接近其天然孔隙比。进水饱和, 调整进出口水位高差到某一定值并保持。开始计时, 一定时间后称量出水量, 测得这一水力梯度下的渗透系数。调整水位高差到其他值, 测定不同水力梯度下的渗透系数, 试验结果汇总列入表 2。

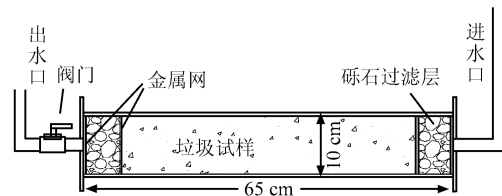


图 1 自制的垃圾土饱和和渗透系数测试装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the device to measure saturated hydraulic conductivity of landfilled waste

表 2 各垃圾样的饱和和渗透系数测试结果

Table 2 Results of tested saturated hydraulic conductivity

试样	e	γ_d /(g/cm ³)	i /%	k_s /(cm/s)	k_s 平均值 /(cm/s)
浅层	2.65	0.41	10	4.60×10^{-2}	4.81×10^{-2}
			50	4.15×10^{-2}	
			100	5.68×10^{-2}	
中层	2.16	0.61	10	2.83×10^{-3}	3.50×10^{-3}
			50	4.25×10^{-3}	
			100	3.42×10^{-3}	
深层	1.78	0.72	10	3.03×10^{-4}	3.56×10^{-4}
			50	4.06×10^{-4}	
			100	3.59×10^{-4}	

试验测得不同深度处垃圾土饱和和渗透系数差别较大, 其中浅层垃圾土饱和和渗透系数较大, 在 10^{-2} cm/s 量级, 这与现场碾压不足、孔隙比较大有关; 中层垃圾土饱和和渗透系数在 10^{-3} cm/s 量级; 深层垃圾土由于降解致使渣土和腐殖质含量增多, 同时上覆压力大, 导致其压密程度较高, 故渗透系数较小, 在 10^{-4} cm/s 量级。

3 垃圾土的土-水特征曲线

采用压力板仪测各深度垃圾土试样的土-水特征曲线, 试验系统如图 2 所示。将垃圾土中大尺寸成分破碎至直径小于 1 cm, 装入 4 个直径为 5.7 cm、高为 5.0 cm 的特制圆筒内, 分层击实到接近其天然密度。需要指出, 通常的压力板仪试验土样置于标准环刀内, 其高度为 2 cm, 本试验中试样高度为 5 cm, 是考虑到垃圾土的非均质特性, 以取得更有代表性的试验结果, 一次采用 4 个试样同时试验也

是出于这一目的。将试样放入饱和缸内饱和后进行试验。



图 2 Cat. No. 1600 压力板仪及其他试验组件

Fig.2 Setup for Cat. No. 1600 5 bar pressure plate extractor

用无气水饱和陶瓷板后,把饱和垃圾土试样放在陶瓷板上,由低到高施加各级气压(最大 500 kPa),各级气压下平衡时称试样重量。各级气压下试验稳定(达到平衡)的标准为:在 24 h 内,垃圾试样的重量含水率变化(通过称容量瓶重量确定)小于 0.2%,本试验中一次平衡的时间大约为 2.5~3 d。将垃圾试样取出,放在烘箱内烘干测定垃圾含水率,考虑到垃圾中含有机物,烘箱的温度控制在 65 °C,烘干时间为 48 h。

根据烘干后的质量计算得到试验时浅层、中层和深层垃圾土试样的实际孔隙比 e 分别为 2.57、2.10 和 1.52,均接近现场垃圾土的孔隙比(表 1)。绘制气压力与体积含水率的关系曲线,即土-水特征曲线如图 3 所示。

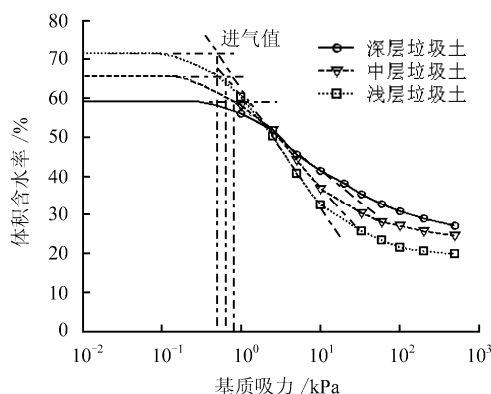


图 3 垃圾土的土-水特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curves of landfilled waste

由图 3 可见:①垃圾土饱和含水率较高,这与垃圾土的大孔隙特性相对应;②垃圾土残余含水率较高,这与垃圾土的有机组分中含固有水相对应;③在 0~10 kPa 的基质吸力范围内,土-水特征曲线斜率较大,这与垃圾土大孔隙中水的排出相对应;④垃圾进气值较低,约在 0.5~0.8 kPa;⑤土-水特

征曲线上基质吸力 33 kPa 对应的含水率为田间持水量,深层、中层和浅层垃圾的田间持水量分别为 35.16%、30.41% 和 25.65%。

本文采用现场垃圾土试样进行试验,各试样的差别主要体现在组分和压密程度上。从 3 种垃圾土的土-水特征曲线对比可知:①埋深越大的垃圾土饱和和含水率越小,这是因为深处的垃圾土比浅处的密实,其孔隙比小;②深层垃圾土残余含水率比浅层垃圾大,这是因为随垃圾土中有机物降解,渣土含量增加,渣土比大颗粒组分能够吸持更多的水分;③随基质吸力增加,浅层垃圾土含水率减小得比深层垃圾土快,即其土-水特征曲线更陡,这是因为浅层垃圾土压密程度低和渣土含量相对较少,其大孔隙特性更加明显。

4 非饱和和渗透系数的预测和试验验证

4.1 基于土-水特征曲线预测垃圾土非饱和渗透系数

垃圾土是大孔隙介质,大尺寸组分含量较多,因此,直接量测垃圾非饱和和渗透系数难度很大。注意到垃圾的非饱和和渗透系数 k_w 是含水率的函数,而基质吸力也是含水率的函数,二者之间存在一定的关系,并且基质吸力和含水率的关系(即土-水特征曲线)相对容易测定,因此,可以基于土-水特征曲线计算渗透系数。

为了进行预测,将含水率与基质吸力的关系以经验公式表达。Brooks 和 Corey^[17]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:

$$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_c} \right)^{-\lambda} \quad (1)$$

式中: S_e 为有效饱和度; $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$; θ 为体积含水率; θ_s 为饱和含水率; θ_r 为残余含水率, ψ 为基质吸力; ψ_c 和 λ 均为待定常数,其中 λ 称为孔径分布指数,是一个表示孔径分布特征的常数; ψ_c 称为始沸压力(即进气值),对应脱湿过程孔隙中出现连续气相的最小基质吸力。

Bear^[18]推导出多孔介质中两相不混容流动时水相的非饱和和渗透系数为

$$k_w = k_s S_e^2 \int_0^{S_e} \frac{dS'_e}{\psi'^2} \bigg/ \int_0^1 \frac{dS'_e}{\psi'^2} \quad (2)$$

式中: k_w 为非饱和和渗透系数; k_s 为饱和和渗透系数。

由式(1)得 $\psi = \psi_c S_e^{-1/\lambda}$,代入式(2)有:

$$k_w = k_s S_e^{3+2/\lambda} \quad (3)$$

在测得垃圾的土-水特征曲线后,就确定了基质吸力和含水率之间的关系,可以通过土-水特征曲线求得 λ ,并可根据式(3)求 k_w 。

为求得 λ ,将式(1)化为如下形式:

$$\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \lambda(-\ln \psi) + \lambda \ln \psi_c \quad (4)$$

若视 $\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 为因变量, $-\ln \psi$ 为自变量,则

$\ln \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 是 $-\ln \psi$ 的线性函数, λ 即直线斜率。对

于本文的深层垃圾土,已由试验结果得到 $\theta_s = 59.32\%$, $\theta_r = 25\%$,将土-水特征曲线按式(4)整理,进行最小二乘直线拟合(如图4所示),得到 $\lambda = 0.37$, $\psi_c = 1.11$ kPa。将 λ 值和 k_s 值代入式(3)得到垃圾渗透性函数如图5所示。同样,可以得到中层垃圾和浅层垃圾的渗透系数,也相应示于图5中。

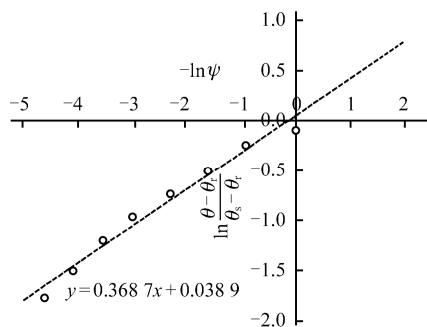


图4 对深层垃圾土土-水特征曲线的最小二乘拟合
Fig.4 A least square fitting for SWCC of deep landfilled waste

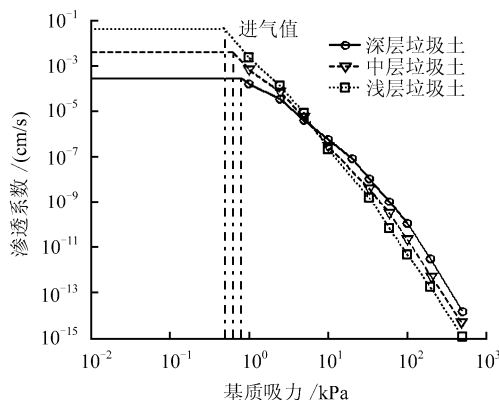


图5 各层垃圾土的渗透性函数曲线
Fig.5 The hydraulic conductivity function curves of waste

由图5可见,超过进气值后,随基质吸力增加垃圾土的渗透系数急剧减小,渗透性函数曲线在基质吸力较小时存在陡降段,这是因为垃圾土大孔隙

中的水排出导致过水截面积显著减小,由于渗流路径绕曲度增加渗透系数迅速减小,陡降段与其大孔隙特性相对应。由各层垃圾土渗透性的对比可知,浅层垃圾渗透性曲线更陡,这是因为其孔隙比更大。

4.2 预测结果的试验验证

为了验证预测方法的准确程度,进行了简单的渗透试验,自制试验装置如图6所示,垃圾土中埋设4个张力计,在顶部缓慢滴水入渗,自上而下垃圾土中基质吸力减小,最后各张力计的读数都变为0,即垃圾土达到饱和状态。根据测得的土-水特征曲线,由各张力计处的基质吸力变化可求得含水率变化,据此计算流速,根据基质吸力差计算水力梯度,再由流速和水力梯度,根据达西定律计算渗透系数。入渗试验完成后继续充分饱和试样,用变水头法测得试样的饱和渗透系数。

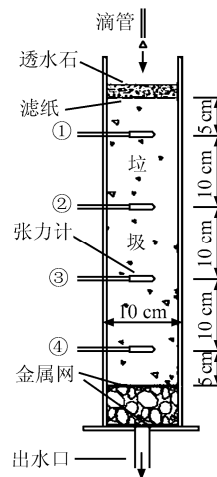


图6 垃圾土入渗试验装置示意图
Fig.6 Schematic diagram of the device to perform infiltration test

取前述中层垃圾土制样,先将垃圾土烘干,按其天然孔隙比和相对密度计算出试样桶中应装入的垃圾土质量。称量出定量的干垃圾土并加少量水拌和均匀,装样后静置一段时间使水分分布更均匀,然后用静脉注射针管缓慢滴水。制样和装样过程中发现若垃圾土过干,则渣土从大尺寸组分上脱落,不能拌匀,因此本文试样中基质吸力较低,约介于5~15 kPa之间。另外,由于大尺寸组分的存在,试验过程中张力计读数减小到0时,目测知试样并未达到饱和状态,这就使得本文中按垃圾土的(脱湿)土-水特征曲线计算得到的含水率变化偏大,从而导致试验结果 k_w 偏大。这些问题也说明了直接量测垃圾土非饱和渗透系数的难度。

共进行了两组试验,试样1和试样2中张力计

的初始读数（负孔压，即基质吸力）及计算所得的各基质吸力对应的非饱和渗透系数如表 3 所示。

将试验得到的垃圾土非饱和（相对）渗透系数和本文基于土-水特征曲线预测得到的相对渗透系数一同示于图 7。可见试验结果稍大于预测值，但两者基本上在同一量级之内。考虑到垃圾土的复杂性和前述试验难度，可以认为预测值与试验结果基本接近，本文预测方法基本可行。另外，也采用 Fredlund 和 Xing^[14]的方法进行了预测，结果也示于图 7。由图可见，按 Fredlund 和 Xing 的方法预测的垃圾土非饱和渗透系数明显小于本文方法预测的结果，同时也明显小于实测值。对比表明，本文方法更适合用来预测垃圾土的非饱和渗透系数。

表 3 试验测得的垃圾土非饱和渗透系数

Table 3 The measured unsaturated hydraulic conductivity of landfilled waste

试样编号	$k_s/(cm/s)$	张力计编号	ψ/kPa	$k_w/(cm/s)$
1	5.05×10^{-3}	①	14.5	3.14×10^{-6}
		②	14.1	4.64×10^{-6}
		③	10.8	4.90×10^{-6}
		④	9.0	5.28×10^{-6}
试样 2	3.62×10^{-3}	①	8.0	5.36×10^{-6}
		②	6.3	1.70×10^{-5}
		③	6.9	7.30×10^{-6}
		④	5.0	1.69×10^{-5}

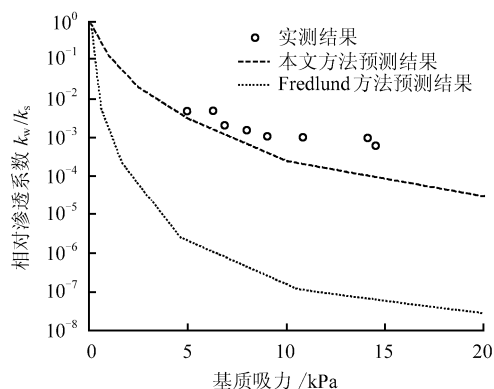


图 7 预测得到的渗透系数和试验结果的比较

Fig.7 Comparison between the predicted results and the measured results

5 结 论

通过室内试验对垃圾土的水力特性进行了研究，试验结果和所提出的预测方法对垃圾填埋场的设计和运行维护具有一定实用价值。

(1) 垃圾土渗透系数随垃圾土填埋龄期和垃圾土中渣土含量的增加而降低，室内常水头试验测得深层、中层和浅层垃圾土的渗透系数分别在 10^{-4} 、

10^{-3} 和 $10^{-2} cm/s$ 量级。

(2) 压力板仪测得的垃圾土的土-水特征曲线在低基质吸力范围内存在陡降段，浅层垃圾土的土-水特征曲线陡于深层垃圾。

(3) 鉴于直接量测垃圾土非饱和渗透系数难度较大，本文提出了一种基于土-水特征曲线预测垃圾土非饱和渗透系数的方法。初步的试验验证表明，预测的非饱和渗透系数与实测结果接近，本文预测方法基本可行。

参 考 文 献

- [1] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of Landfill Design and Construction[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 2002.
- [2] CHEN T H, CHYNOWETH D P. Hydraulic conductivity of compacted municipal solid waste[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 51: 205—212.
- [3] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea[J]. *Journal of Waste Management*, 2002, 22: 261—267.
- [4] 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.
- [5] LANDVA A O, CLARK J I. Geotechnical testing of waste fill[C]//Proceedings of Canadian Geotechnical Conference. Ottawa: Ontario, 1990: 371—385.
- [6] 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.
- QU Xian, HE Pin-jing, SHAO Li-ming, et al. Research on hydraulic conductivity test of compacted municipal solid waste[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(12): 13—17.
- [7] 王洪涛, 殷勇, 王昊. 生活垃圾非饱和渗透性质测定的多步出流方法[J]. *环境科学*, 2006, 27(10): 2123—2128.
- WANG Hong-tao, YIN Yong, WANG Hao. Multi-flow method to measure the unsaturated hydraulic conductivity of municipal solid wastes[J]. *Envorionmental Science*, 2006, 27(10): 2123—2128.
- [8] MCDUGALL J R, SARSBY R W, HILL N J. A numerical investigation of landfill hydraulics using variably saturated flow theory[J]. *Géotechnique*, 1998, 48(1): 143—144.

- [9] KAZIMOGLU Y K, MCDOUGALL J R, PYRAH I C. Unsaturated hydraulic conductivity of landfill waste[C]//Unsaturated. [S. l.]: 2006, ASCE, 2006: 1525—1534.
- [10] BLIGHT G E, BALL J M, BLIGHT J J. Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1992, 118(6): 865—877.
- [11] STRAUB W A, LYNCH D R. Models of landfill leaching: moisture flow and inorganic strength[J]. **Environmental Engineering Division**, 1982, 108: 231—250.
- [12] KORFIATIS G P, DEMETRACOPOULOS A C. Moisture transport in a solid waste column[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 1984, 110(4): 789—796.
- [13] NOBLE J J, ARNOLD A E. Experimental and mathematical modeling of moisture transport in landfills[J]. **Chemical Engineering Communication**, 1991, 100: 95—111.
- [14] FREDLUND D G, XING A, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 533—547.
- [15] VAN GENUCHTEN M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. **American Journal of Soil Science Society**, 1980, 44: 892—898.
- [16] KAZIMOGLU Y K, MCDOUGALL J R, PYRAH I C. Unsaturated hydraulic conductivity of landfill waste[C]//Unsaturated Soils. [S. l.]: ASCE, 2006: 1525—1534.
- [17] BROOKS R H, COREY A H. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [18] BEAR J. Hydraulics of groundwater[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.