

填埋场连续型排水结构中最大饱和深度的计算

张金利¹ 王铁军²

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学土木水利学院
岩土工程研究所, 辽宁大连 116024)

【摘要】 确定填埋场中的最大饱和深度是进行渗滤液导排系统设计的关键技术参数。针对倾斜场地上的连续型排水结构, 基于流量连续条件、Dupuit假设与扩展 Dupuit假设, 在稳态渗流下, 分别建立了浸润线方程, 采用数值方法进行计算。通过变动参数计算与分析表明, 当场地坡度小于10%时, 可采用 Dupuit假设下的计算方法进行计算。对于采用土工排水网的连续型排水结构, 土工排水网导水率与场地坡度为控制填埋场最大饱和深度的重要因素; 保护层渗透系数与人渗率对于控制排水系统的排水效率具有不可忽视的作用。同时比较了水平场地上的锯齿型与连续型排水结构的排水效率, 表明前者优于后者。

【关键词】 填埋场; 最大饱和深度; 连续型排水结构

【中图分类号】 X 705

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2009.04.006

The Calculation of Maximum Saturated Depth in Landfill with Continuous-slope Configuration Drainage System

Zhang Jinli Wang Tiejun

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

【Abstract】 Maximum saturated depth is an important parameter in designing of landfill leachate drainage systems. Based on the groundwater flow continuity principles, Dupuit assumptions and extend Dupuit assumptions, phreatic surface governing equations were established over the landfill with slope liner in continuous-slope configuration drainage system, respectively. These equations were solved by numerical calculation. Though computation and analysis of change parameters, the results indicate that Dupuit assumptions can be used to calculate the maximum saturation depth as the slope of landfill liner is less than 10%. When geonet is employed in continuous-slope configuration drainage system, transmissivity of geonet and slope of landfill liner are important influence factors for maximum saturation depth, hydraulic conductivity of protect layer and impingement rates for efficiency of drainage system can't be ignored. At the same time, compared the efficiency of continuous-slope with saw-tooth configuration's in level landfill liner, the results show the former is better than the latter.

【Key words】 landfill; maximum saturated depth; continuous-slope configuration

0 引言

由于降雨入渗、地下水浸入及垃圾含有一定水分等因素, 在卫生填埋场中往往汇集一定数量的渗滤液, 为此, 需要及时有效排放。在设计填埋场渗滤液收集与处理系统时, 确定渗滤液导流层上的最大饱和深度关系到渗滤液收集系统的效率与垃圾堆体的稳定性。因此, 一般要求其水位低于某一限值。

如美国环保局规定, 导流层上的最大水位为 30 cm, 我国《生活垃圾卫生填埋场填埋技术规范》^[1] (CJJ17—2004, J302—2004) 对此未进行明确规定。填埋场渗滤液导排系统设计一般可划分为清污分流系统与底部的渗滤液收集与处理系统。填埋场底部渗滤液收集与处理系统, 一般包括导流层、盲沟、集液井(池)、调节池、泵房、污水处理设施。其中, 导流层

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679015); 中国科学院武汉岩土力学研究所湖北省环境岩土工程重点实验室开放课题资助项目(T110504)

作者简介: 张金利, 1964年生, 男, 吉林东辽人, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程方面研究工作。E-mail: zhangjinli7910@sina.com

与盲沟是该系统的重要组成部分,盲沟一般布置在导流层下,材料可采用砾石或开孔 HDPE 管。盲沟一般采用纵横交错布置方式,可分为锯齿型与连续型两种类型。因排水间距、断面尺寸、砾石粒径或开孔管开孔数量与直径、导流层厚度与材料等对渗滤液排放效率,具有重要影响。

Moore^[2,3]对锯齿型排水结构,给出了导排层上最大深度的近似计算公式,但未给推导过程。McEnroe^[4,5]分别在标准与扩展 Dupuit 假设下,给出估算渗滤液最大深度计算式。Xuede Qian^[6]针对具有一定坡度填埋场渗滤液收集系统,给出渗滤液最大饱和深度计算方法。Giroud 等^[7]提出了简化数值方法。柯翰^[8,9]给出了层状介质和复合排水系统中渗滤液最大深度的计算方法。对于连续型排水结构,由于分水岭位置(L)不确定,在确定导流层上的最大水位一般需要进行一定假设。McBean^[10]在 Dupuit 假设条件下,依据流量连续条件建立出了最高水头的半解析解,因解的形式复杂,且计算过程对精度要求较高^[11]。

针对坡地上的填埋场底部连续型排水结构,基于流量平衡条件与相应的边界条件,分别在 Dupuit 与扩展 Dupuit 假设条件下,建立了导流层上最高水头的控制方程,采用数值方法进行求解,通过变动参数计算与分析,探讨了各个参数对最高水位的影响。同时对土工排水网在连续型排水结构中的特性进行了分析。

1 连续型排水结构浸润线方程

1.1 Dupuit 假设下的浸润线方程

假设填埋场处于坡地上,其倾角为 α ,对于连续型排水结构,可取两条相邻盲沟作为研究对象(见图 1)。在稳定渗流下,依据流量连续条件,在 $L-x$ 上竖直入渗量与坡面的流出量相等,即

$$Q=P(L-x) \tag{1}$$

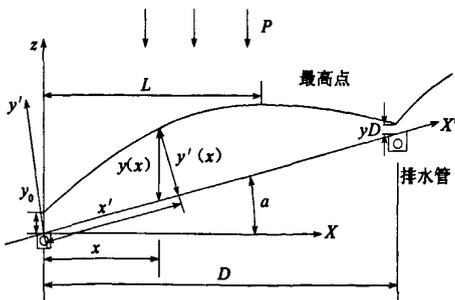


图 1 连续型排水结构计算示意图

式中:Q为导流层单位宽度排水量;P为垃圾堆体单位时间单位面积入渗到导流层上的流量;L为导流层上的分水岭位置。浸润线任意点位置为:

$$z=y+Sx \tag{2}$$

式中: $S=\tan\alpha$

Dupuit 假设流线水平,等势线竖直,在稳态条件下,沿坡面的流量可表示为^[12]

$$Q=ky \frac{dz}{dx} \tag{3}$$

式中:k为渗透系数;y为坡面上的水头。联立式(1)~式(3)可得

$$\frac{dy}{dx}=\frac{P(L-x)}{ky}-S \tag{4}$$

或
$$\frac{dz}{dx}=\frac{P(L-x)}{k(z-Sx)} \tag{5}$$

为求解式(4)或式(5)需要给出相应的边界条件

$$x=0, \quad y_0=PD/k \tag{6}$$

$$x=D, \quad y_D=PD/k \tag{7}$$

因式(4)或式(5)中包含未知参数 L,需要迭代求解。当 $dz/dx=S$ 时,可得到导流层上最大饱和深度 $y=y_{max}$ 。

1.2 扩展 Dupuit 假设下的浸润线方程

当场地坡度较大时,依据 Dupuit 假设与实际情况偏差较大,在此假设流线方向与坡面平行(即扩展 Dupuit 假设)。取坐标轴为 x', y' , (见图 1)。依据渗流连续条件,可得

$$Q=-ky'dz/dx' \tag{8}$$

式中: $y'=y \cdot \cos\alpha$

$$x'-ysin\alpha=x/\cos\alpha \tag{9}$$

联立式(1),可得

$$\frac{dy}{dx}=\frac{yS-R^*(L-x)(1+S^2)}{R^*S(L-x)-y} \tag{10}$$

式中: $R^*=P/k$

边界条件采用式(6)与式(7)。采用数值计算方法,通过迭代进行求解。

2 计算结果与分析

2.1 两种计算方法下最大饱和深度差异分析

式(5)与式(10)分别基于 Dupuit 与扩展 Dupuit 假设所建立连续型排水结构上浸润线控制方程,为比较两个控制方程所计算的坡面最大水位差异,针对① $P=5 \text{ mm/d}, k=0.01 \text{ cm/s}, D=100 \text{ m}$; ② $P=8 \text{ mm/d}, k=0.01 \text{ cm/s}, D=200 \text{ m}$ 两种情况,在变动参数 S 下,分别进行计算,结果见图 2。

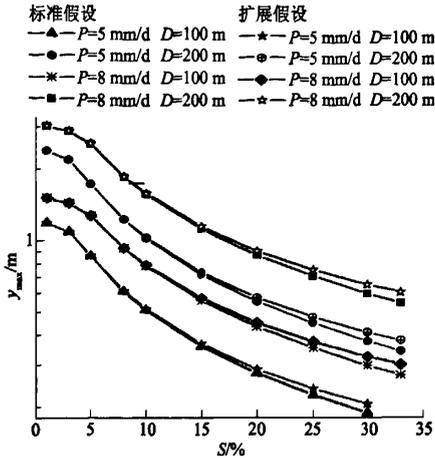


图2 不同方法下 y_{max} 的对比分析

由图2可知,当场地坡度增加时,坡面上的最大饱和深度逐渐降低,当场地坡度小于10%,两种计算方法所得到的 y_{max} 相差较小,当坡度大于20%时,所产生的误差较大。不同排水盲沟间距与入渗率对两种计算方法计算结果未产生影响。

2.2 盲沟水头变化影响分析

由上节分析可知,对于连续型排水结构,当场地坡度较小时,两种计算方法所得到的坡面最大饱和深度差异较小,因而可采用式(5)进行计算。当假设排水盲沟具有自由排水条件下(即 $dz/dx = -1$),盲沟上的水头可表示为 $y_0 = PD/k$ 。

假设计算参数分别为 $P=5 \text{ mm/d}$, $k=0.01 \text{ cm/s}$, $D=100 \text{ m}$, $S=3\%$, $y_0 = PD/k = 0.05787$ 。针对盲沟上的水头分别为 $y_0, 2y_0, 3y_0, 10y_0$ 等情况进行具体计算,得到 y_{max} 分别为 1.155 m, 1.160 m, 1.169 m, 1.307 m。当盲沟间距较大,场地坡度较小时,盲沟上的水头变化对坡面上的最大饱和深度影响不大。

2.3 排水间距变化对分水岭位置与最高水位影响

对于连续型排水结构,排水间距为重要的设计参数。为此针对 $S=2\%$, $k=0.01 \text{ cm/s}$, $P=3 \text{ mm/d}$ 下,探讨参数 D 变动的影晌,计算结果见表1。

表1 不同排水间距下分水岭位置与最大饱和深度计算结果

盲沟间距 D/m	分水岭位置 L/m	最高饱和深度 y_{max}/m	相对位置 L/D	相对饱和深度 y_{max}/D
10	8.801	0.0868	0.8801	0.00867
20	17.604	0.1735	0.8802	0.008675
30	26.407	0.2604	0.8802	0.00868
40	35.209	0.347	0.8802	0.008675

续表

盲沟间距 D/m	分水岭位置 L/m	最高饱和深度 y_{max}/m	相对位置 L/D	相对饱和深度 y_{max}/D
50	44.004	0.4336	0.8801	0.008672
60	52.805	0.5203	0.8801	0.008672
70	61.609	0.6070	0.8801	0.008671
80	70.418	0.6940	0.8802	0.008675
90	79.225	0.7807	0.8803	0.008674
100	88.03	0.8674	0.8803	0.008674
110	96.810	0.9539	0.8801	0.008672
120	105.62	1.041	0.8801	0.008675

由表1可见,对于确定的场地坡度、渗透系数与入渗率下,当盲沟间距逐渐增加时,坡面上的最大渗滤液饱和深度逐渐加大,分水岭位置由坡底向坡顶移动。但分水岭相对位置(L/D)与相对饱和深度(y_{max}/D)与排水间距变化无关。

2.4 场地坡度 S 与无量纲量 R^* 对最大饱和深度影响

为比较场地坡度、入渗率、渗透系数的综合影响,针对不同坡面坡度与参数 R^* 进行具体计算,计算结果见图3。

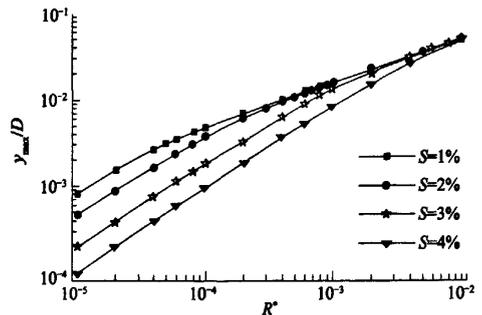


图3 场地坡度与参数 R^* 对 y_{max}/D 的影响

由图3可见,当场地坡度一定时, y_{max}/D 随 R^* 增加,即入渗率增加时,在一定排水量条件下,渗滤液在填埋场底部出现积累,引起坡面上的最大水位随之增加。当参数 R^* 确定且较小情况下,坡面上的最大饱和深度随场地坡度增加而减小。当 $R^* = 0.01$ 时,可不考虑场地坡度的影响。

2.5 锯齿型与连续型排水结构排水效率比较分析

对于锯齿型排水结构,采用下列方程进行计算^[8]

$$\frac{dy}{dx} = \tan \alpha - Px / \int_0^y k(t) dt \quad (11)$$

相应的边界条件采用式(7)。

这里假设填埋场底部最大饱和深度为 30 cm。为分析与探讨两种排水结构的排水效率,通过变动参数计算与分析,进而确定影响两种排水结构效率的因素。计算结果见图 4~图 6。

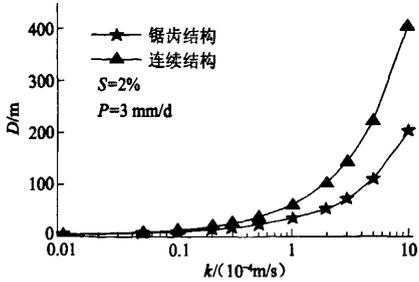


图 4 允许最大排水距离随排水层渗透系数的变化

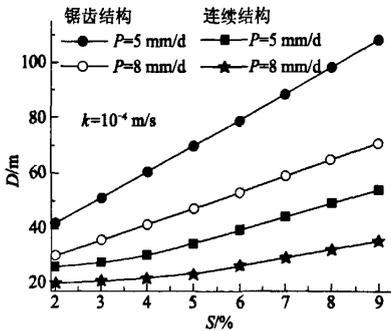


图 5 不同入渗率下允许最大排水距离随场地坡度的变化

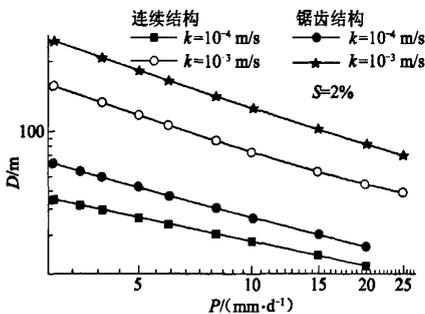


图 6 不同渗透系数下允许最大排水距离随入渗率的变化

由图 4 可见,当入渗率与场地坡度确定下,锯齿型排水结构效率较高。当两种排水结构排水量相同时,由图 5 可见,随坡面坡度增加,最大允许排水距离均增加,但锯齿型增加幅度较大,表明其排水效率较高。当入渗率增加时,相应的最大允许排水距离均减小。当坡面坡度确定时,由图 6 可见,最大允许排水距离随入渗率增加而降低,随排水量增加而增加。锯齿型排水结构效率高于连续型排水结构。

为了综合比较两种排水结构的排水效率,这里

引入两个无量纲参数

$$R = \frac{P}{k \sin^2 \alpha} \quad (12)$$

$$\delta D = \frac{(D_1 - D_2)}{D_2} \quad (13)$$

式中: D_1, D_2 分别表示锯齿型与连续型排水结构最大允许排水距离。

变动参数分别计算,结果见图 7。

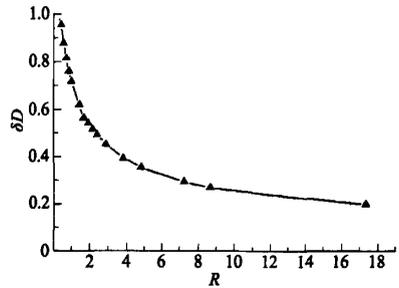


图 7 参数 R 变化对参数 delta D 的影响

由图 7 可见,随参数 R 增加,参数 δD 逐渐降低,表明两种排水结构的最大排水距离相差较小,排水效率相近;当参数 R 处于较小值时,锯齿型排水结构明显优于连续性排水结构。由此可见,当进行填埋场底部排水系统设计时,当条件允许下,尽量采用锯齿型排水结构。

3 连续型排水结构中土工排水网特性分析

土工排水网具有排水效率高、耐久性强、易于施工、节省填埋场空间等诸多优点,在填埋场排水结构中得到了应用。对于锯齿型排水结构,国内外许多学者进行了研究^[4-9]。本文对于采用土工排水网的连续型排水结构,假设土工排水网渗透系数为渗滤液饱和深度的函数,在 Dupuit 假设下,依据流量平衡,可建立如下控制方程

$$Q = ky \frac{dz}{dx} = \frac{dz}{dx} \int_0^y k(t) dt = \left(\frac{dy}{dx} + S \right) \int_0^y k(t) dt \quad (14)$$

联立式(3)得:

$$(L-x)P = \left(\frac{dy}{dx} + S \right) \int_0^y k(t) dt \quad (15)$$

$$\frac{dy}{dx} = (L-x)P / \left(\int_0^y k(t) dt \right) - S \quad (16)$$

设土工排水网厚度为 T_1 , 渗透系数为 k_1 , 保护层渗透系数为 k_2 , 当渗滤液饱和深度大于 T_1 时,则

$$\int_0^y k(t) dt = T_1 k_1 + (y - T_1) k_2$$

$$T_1 (k_1 - k_2) + y k_2$$

式(15)可改写为

$$\frac{dy}{dx} = (L-x)P/[T_1(k_1-k_2) + yk_2] - S \quad (17)$$

对于所建立的控制方程, 采用迭代方法求解。在计算中, 首先由式(6)计算 y_0 , 并进行如下判断, 当 $y_0 \leq T_1/\cos\alpha$ 时, 即浸润线高度没有超过土工排水网的厚度, y_0 不变; 当 $y_0 > T_1/\cos\alpha$ 时, 渗滤液已经进入保护层, 此时

$$y_0 = \left[PD + \frac{T_1(k_2 - k_1)}{\cos\alpha} \right] / k_2 \quad (18)$$

3.1 场地坡度影响分析

假设计算参数分别为 $D=100\text{ m}$, $k_2=10^{-4}\text{ m/s}$, $T_1=5\text{ mm}$, $P=5\text{ mm/d}$ 下, 变动土工排水网渗透系数 k_1 , 在不同坡面坡度条件下, 分别计算坡面上的最大饱和深度 y_{\max} , 计算结果见图 8。

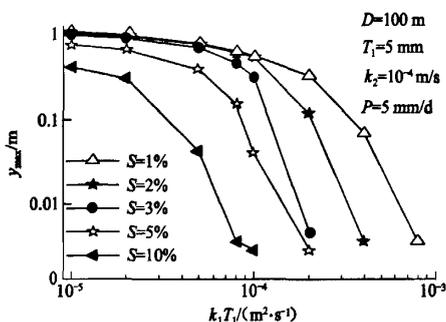


图 8 土工排水网导水率 $k_1 T_1$ 对 y_{\max} 的影响

由图 8 可见, 当场地坡度处于 1%~3% 与土工排水网导水率处于 $10^{-5} \sim 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ 范围内时, 土工排水网导水率变化对最大饱和深度影响较小。当坡地坡度较大时, 排水网导水率对最大饱和深度影响较大。当土工排水网导水率大于 $10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ 时, 最大饱和深度急剧下降, 表明渗滤液在填埋场底部积累较少。当场地坡度较大时, 随土工排水网导水率增加, 最大饱和深度显著下降。通常条件下, 土工排水网的导水率较高, 可满足填埋场排水要求, 但当土工排水网上的反滤层淤堵后, 土工排水网导水率显著下降, 可导致渗滤液的大量积累。因此, 采用土工排水网时, 需要考虑淤堵的影响。

3.2 保护层渗透系数对最大饱和深度影响

假设计算参数分别为 $D=50\text{ m}$, $k_1 T_1 = 3 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$, $P=7, 5, 3\text{ mm/d}$ 下, 变动保护层渗透系数 k_2 , 在不同坡面坡度条件下, 分别计算坡面上的最大饱和深度, 计算结果见图 9~图 10。

由图 9 可见, 随保护层渗透系数逐渐增加, 最大饱和深度相应下降。场地坡度处于 1%~5% 范围

内, 随场地坡度增加, 最大饱和深度下降, 但影响较小。当场地坡度为 10% 时, 最大饱和深度小于土工排水网厚度, 表明未产生渗滤液积累。

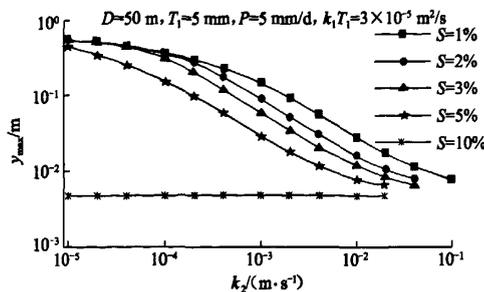


图 9 保护层渗透系数 k_2 对 y_{\max} 的影响

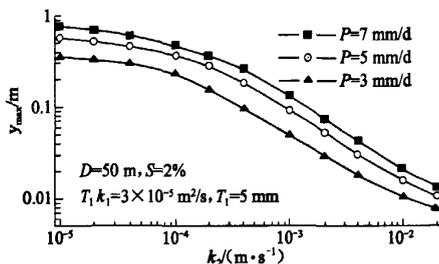


图 10 不同入渗率的条件下 y_{\max} 和保护层渗透系数关系

场地坡度为 2%, 不同入渗率下, 最大饱和深度的计算结果见图 10。由图 10 可见, 当入渗率逐渐增加时, 最大饱和深度相应增大, 表明在土工排水网导水率一定时, 随入渗率增加, 填埋场底部所产生的渗滤液积累量相应增多, 由此引起最大饱和深度增大。

3.3 排水距离对最大饱和深度影响

假设计算参数分别为 $k_2=10^{-4}\text{ m/s}$, $S=2\%$, $P=3\text{ mm/d}$ 下, 变动土工排水网不同导水率 ($k_1 T_1$) 与排水距离, 计算相应的最大饱和深度, 结果见图 11。

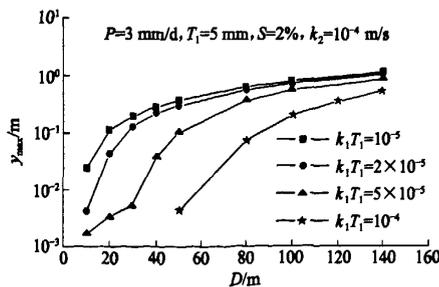


图 11 不同土工排水网导水率下 y_{\max} 和排水距离的关系的影响

由图 11 可见,当 $k_1 T_1$ 处于较低量级时,随排水距离增加,坡面最大饱和深度存在一个陡升段,然后平缓上升;当 $k_1 T_1$ 处于较高量级时,在自由排水条件下,随排水距离增加,坡面上的最大饱和深度相应增加,但增加幅度较小。由此可见,导排层渗透特性可显著影响填埋场渗滤液排放。

4 结 论

对于连续型排水结构在确定最大饱和深度时,需要考虑入渗率、导排层的渗透系数、场地坡度和排水距离等因素。基于流量连续和 Dupuit 假设条件,建立了渗滤液浸润线的控制方程,并采用数值计算方法进行求解。通过变动参数计算与分析,可得到以下结论。

1) Dupuit 假设与扩展 Dupuit 假设下,当场地坡度小于 10% 时,两种方法计算得到的最大饱和深度基本相同,对于场地坡度较小情况,可直接采用 Dupuit 假设进行计算以简化计算。

2) 对于相同场地条件,锯齿型排水效率高于连续型排水结构。

3) 采用土工排水网的连续型排水结构,土工排水网导水率与场地坡度为控制填埋场最大饱和深度的重要因素;保护层渗透系数与入渗率对于控制排水系统的排水效率具有不可忽视的作用。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国建设部. CJJ17—2004, J302—2004 城市生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] U. S. Environmental Protection Agency. EPA/536/SW-869-C Landfill and surface impoundment performance evaluation [R]. 1980.
- [3] U. S. Environmental Protection Agency. SW-869

Landfill and surface impoundment performance evaluation[R]. 1983.

- [4] MCENROE B M. Steady drainage of landfill covers and bottom liners[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1989, 115(6): 1114-1122.
- [5] MCENROE B M. Maximum saturated depth over landfill liners[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1993, 119(2): 262-270.
- [6] QIAN X D. Estimation of maximum liquid head over landfill barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, 130(5): 488-497.
- [7] GIROUD J P, GROSS B A, DARASSE J. Flow in leachate collection layers, steady-state[M]. GeoSyntec Consultants Rep, 1992.
- [8] 柯 瀚, 黄传兵, 陈云敏. 成层介质中填埋场渗滤液的最大饱和深度[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1194-1197.
- [9] 柯 瀚, 陈云敏. 填埋场复合排水系统中最高水位深度的计算[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 160-165.
- [10] MCBEAN E A, ROVERS F A, FARQUHAR G J. Solid waste landfill engineering and design[M]. Englewood Cliffs N J: Prentice Hall, 1995.
- [11] GIROUD J P, ZORNBERG J G, ZHAO A. Hydraulic design of geo-synthetic and granular liquid collection layers[J]. Geo-synthet Int. 2000, 7(4-6): 285-380.
- [12] CHAPMAN T G. Modeling groundwater flow over sloping beds[J]. Water Resour Res. 1980, 16(6): 1114-1118.

收稿日期: 2009-04-27