文章编号：1000-8608(2009)06-0913-06

垃圾填埋场ET封顶系统水分平衡数值分析

陆海军*[1,2]， 栾茂田[1,2]， 张金利[1,2]

（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： 针对垃圾填埋场压实黏土最终封顶易受气候影响而开裂(干裂缝或冻融裂缝)，其工程特性显著降低的缺陷，介绍了新型ET(蒸发传输)封顶系统的工作机理.在同时考虑降水和蒸发补给的作用下，建立了水汽在ET封顶系统迁移的一维数学模型.以大连市1976年的降水和蒸发补给气候条件为边界条件，模拟了ET封顶系统中的水汽在1 a内变化规律.从分析模拟结果得出，距地面越近含水率受降水、蒸发补给气候条件的影响越显著，且随着深度的增加出现明显的峰值滞后现象.阻隔土壤层中的水分未达到饱和状态，说明总厚为150 cm的ET封顶系统完全可以抵御大连市近48 a以来最大强降水的冲击.对降水强度、降水持续时间以及阻隔层的厚度等参数进行了分析.数值分析与试验数据对比结果表明，计算值和试验数据基本吻合，验证了模型的可靠性.研究工作为建造垃圾填埋场ET封顶系统提供了理论依据.

关键词： 蒸发传输；垃圾填埋场；封顶系统；含水率
中图分类号： TV131.2 **文献标志码：** A

0 引 言

现代卫生填埋场的主要目的是把垃圾和周围的环境隔离，减少垃圾对人类和周围环境的威胁.封顶系统是达到此目的的一个关键的设计单元，其主要作用是阻止水分进入到垃圾体中，减小渗滤液产量，降低填埋场运行成本.水分一旦进入垃圾中，就可能携带污染物质穿透底部的衬垫层渗透到地下水中，造成地下水的污染.压实黏土封顶系统在干旱和半干旱地区，由于降水量小蒸发量大，往往导致压实黏土层失水严重，出现干裂缝，渗透系数提高，防渗性能显著下降[1]，另外植物根部也能穿透压实黏土层，破坏其防渗功能[2].近几年，美国一些垃圾填埋场正在尝试用一种新的ET（蒸发传输）封顶系统代替传统的压实黏土封顶系统，并取得了初步的研究成果[3,4].Schnabel等[3]对阿拉斯加州的朱诺、安克雷奇和费尔班克斯3个严寒地区建造ET封顶的适用性进行了分析，结果发现类似于费尔班克斯那种寒冷、干燥同时全年最大降水量与蒸发量基本相当的地区，ET封顶系统运行的效果较好，而安克雷奇地区ET封顶系统的运行与所选土壤材料有很大关系.Wayllace等[4]对不同气候条件下ET封顶系统的水分平衡进行了数值分析研究，并对降雨强度、降雨持续时间、蒸发强度以及土壤层厚度等参数进行了灵敏度分析.ET封顶系统在干旱、半干旱地区尤为常见，基本结构是由一层支持植物生长的土壤层和几层阻隔土壤层构成，其工作机理是在降水阶段通过储存水分的方法减少水的渗入，在干燥阶段通过蒸发和植物的蒸腾作用散发先前储存的水分，在这个过程中蒸发和植物蒸腾的强度以及土壤储存水分的能力起到关键的作用[5,6].ET封顶系统不但具有比较大的抗干燥开裂的能力，同时还具有造价低、服务年限长和效果好等优点，估计这种垃圾填埋场的封顶系统将逐步取代现有的压实黏土封顶系统[7].

基于ET封顶系统的工作机理，在考虑降水和蒸发的边界条件下，本文建立一维非饱和土水汽运移的数值模型，并结合大连市气象统计资料，

收稿日期： 2007-10-15； **修回日期：** 2009-09-01.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50639010,50678032).
作者简介： 陆海军*(1979-)，男，博士生，E-mail:luhaijun111@163.com；栾茂田(1962-)，男，教授，博士生导师.

采用实测的两种土壤的土水特性曲线，进行具体计算与分析，同时分析参数的灵敏度，以此对 ET 封顶系统的适用性进行评价.

1 数值模型

1.1 水汽运移的控制方程

垃圾填埋场的 ET 封顶系统是由顶面植物生长土层和其下层阻隔土层组成. 假设两层土壤为均质、各向同性的多孔介质，建立了水汽在垃圾填埋场 ET 封顶系统中运移的一维模型，如图 1 所示.

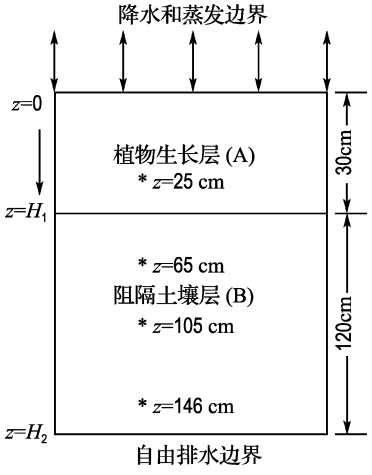


图 1 垃圾填埋场研究区域及边界条件示意图

Fig. 1 A representative landfill with boundary condition

水汽在两层土壤中运移的控制方程为[8]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial h}{\partial z}\right]-\frac{\partial K(\theta)}{\partial z}\pm Q \tag{1}$$

式中：θ 为体积含水量；h 为基质压力势；K 为渗透系数；t 为时间；z 为土壤的剖面纵向深度坐标，以向下为正；Q 为源汇项.

土水特征函数采用 Van Genuchten (1978) 模型定义[9]：

当 $h<0$

$$S_e=(1+|\alpha h|^{\beta})^{-\gamma} \tag{2}$$

$$K_r=K_s S_e^{1/2}\left[1-(1-S_e^{1/\gamma})^{\gamma}\right]^2 \tag{3}$$

当 $h>0$

$$S_e=1 \tag{4}$$

$$K_r=1 \tag{5}$$

式中：S_e 为有效饱和度，$S_e=(\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r)$，$\theta_r$ 为残余含水率，θ_s 为饱和含水率；K_s 为饱和渗透系数；K_r 为相对渗透系数；α、β、γ 为土水特性参数，且 β、γ 满足 $\gamma=1-1/\beta$.

1.2 定解条件

模型的初始条件为

$$\theta(z,t)=\theta_1;\ 0\leqslant z<H_1,t=0 \tag{6}$$

$$\theta(z,t)=\theta_2;\ H_1\leqslant z<H_2,t=0 \tag{7}$$

式中：θ_1 为植物生长层土壤的初始体积含水率，H_1 为其厚度；θ_2 为阻隔层土壤的初始体积含水率，H_2 为其厚度.

边界条件为[10]

(1) $z=0$ 上边界既是渗流边界又是蒸发边界

$$\left(-K_1\frac{\partial h}{\partial z}+K_1\right)\Big|_{z=0}=q(t)-e(t) \tag{8}$$

式中：K_1 为植物生长层的水力传导系数；$q(t)$ 为降水强度；$e(t)$ 为蒸发强度.

(2) $z=H_2$ 下边界是自由排水边界

$$-K_2\frac{\partial h}{\partial z}\Big|_{z=H_2}=0 \tag{9}$$

式中 K_2 为阻隔土壤层的水力传导系数.

(3) $z=H_1$ 两层土壤的交界面必须保证水流的连续性

$$\left(-K_1\frac{\partial h}{\partial z}+K_1\right)\Big|_{z=H_1}=\left(-K_2\frac{\partial h}{\partial z}+K_2\right)\Big|_{z=H_1} \tag{10}$$

2 模拟区域与土壤特性

2.1 模拟区域

如图 1 所示，计算区域深为 150 cm. 采用支持植物生长的上层土壤(A)为 30 cm，下层的阻隔土壤层(B)为 120 cm. 模型的上边界由降水和蒸发边界组成，下边界是自由排水边界. 在模型区域中设立了 4 个观察点，用来监测不同深度的含水率随时间的变化情况，位置分别为 $z=25$、65、105、146 cm.

2.2 土壤与计算参数

土壤 A 为大连本地的砂土，土壤 B 为残积土. 通过室内实验确定土壤的工程特性，包括土壤的液限 W_l、塑限 W_p、塑性指数 I_p、最大干密度 ρ_{dmax}、最优含水量 W_{opt}、孔隙比 e、相对密度 G_s、饱和渗透系数 K_s. 土水特征曲线 SWCC 采用压力板仪测得，在检测的过程中未考虑滞回效应. 土的工程特性参数与计算参数列于表 1，土水特征曲线如图 2 所示.

表 1　土壤工程特性与计算参数

Tab. 1　Soil properties and modeling parameters

参数	数值	
	土壤 A	土壤 B
W_l	28.1	33.7
W_p	16.2	20.1
I_p	11.9	13.6
$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	1.83	1.74
$W_{opt}/\%$	13.7	18.4
e	0.44	0.52
G_s	2.61	2.63
$K_s/(cm \cdot s^{-1})$	7.06×10^{-3}	8.02×10^{-5}
α/cm^{-1}	0.022	0.026
β	1.29	1.26
γ	0.225	0.206
θ_r	0	0
θ_s	0.303	0.363

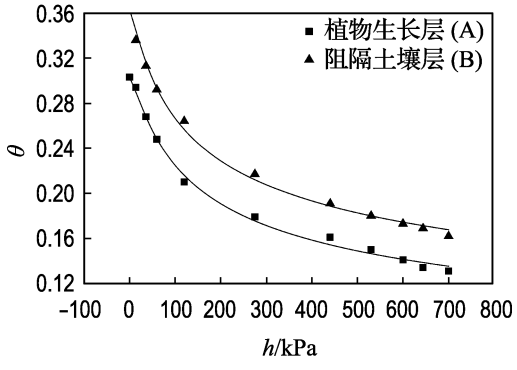


图 2　土壤 A 和 B 的土水特征曲线

Fig. 2　SWCC of soil A and B

2.3　初始条件与边界条件的确定

植物生长层和阻隔土壤层的初始体积含水率分别为 0.15 和 0.20. 边界条件由降水和蒸发强度确定. 根据大连市气象局资料，1976 年是大连市近 48 a 来汛期降水强度最大的年份[11]，短时间内的强降水对垃圾填埋场的封顶冲击性比较大，其全年的日降水量分布如图 3 所示. 第一季度、第二季度和第四季度平均日蒸发量为 4.2 mm/d，第三季度平均日蒸发量为 8.4 mm/d.

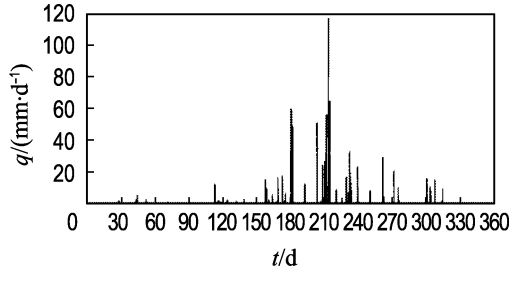


图 3　1976 年大连日降水量直方图

Fig. 3　Precipitation quantum of Dalian in 1976

3　数值分析与模型验证

3.1　数值分析

在数值计算过程中降水量采用日平均值，蒸发量则按每一季度的平均值来确定. 在 1976 年的降水和蒸发循环作用下，土壤中水分随时间的变化如图 4 所示.

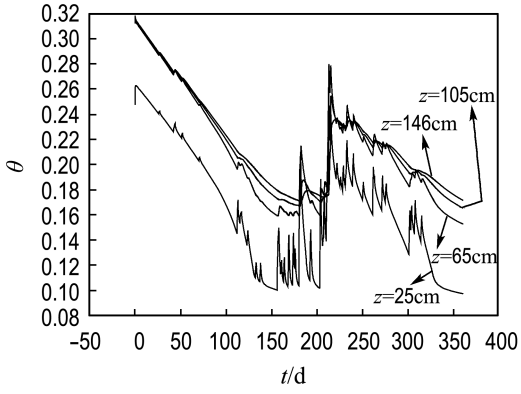


图 4　ET 封顶层中不同深度的含水率

Fig. 4　Moisture contents at various depths in evapotranspirative cover

由图 4 中可以看到，离土壤表面越近，土壤中的含水率受降水和蒸发的影响越灵敏，$z=25$ cm 处含水率最大变化为 0.161；$z=146$ cm 处含水率最大变化为 0.063，影响明显变缓. 造成这种现象的主要原因是植物生长层的渗透系数大，边界的降水和蒸发可以直接作用整层土壤，致使土壤中的水分变化幅度比较大；阻隔土壤层的渗透系数相对比较小，上层土壤中的水分变化对其影响强度弱，所以此层土壤中的水分变化幅度相对较小. $z=105$ cm 处的土壤水分变化曲线的峰值出现在第 213 d，这主要是受到第 213 d 的强降水的影响；$z=146$ cm 处的峰值却出现在第 221.1 d，出现了明显的峰值滞后现象，主要是由于阻隔土壤层中的有效孔隙少，水分在对流、扩散的作用下向土层深部渗透的时间相对延长，这种现象对阻止水分在强降水的条件下穿透封顶系统进入垃圾填埋场中起到了至关重要的作用. 在整个降水和蒸发的循环补给作用下，阻隔土壤层中的水分均未达到饱和状态，说明植物生长层为 30 cm、阻隔土壤层为 120 cm 的 ET 封顶系统可以抵御大连极少见的强降水的冲击.

为了更明显地说明 ET 封顶系统中含水率的变化情况，给出不同时间的土壤剖面含水率变化，

如图 5 所示. 分析图 5 可以得出，$t=50$ d 的土壤剖面水分变化曲线明显地分为 3 个阶段，深度在 25 cm 以上为第 1 阶段，含水率为 0.221；25～35 cm 为第 2 阶段，含水率从 0.221 过渡到 0.266；35 cm 以下为第 3 阶段，含水率基本保持在 0.268 左右. $t=150$ d 和 $t=360$ d 的土壤剖面水分变化情况接近，25 cm 以上土层中的含水率一致，25 cm 以下的水分随着深度的延伸逐渐增加. $t=213$ d 的土壤剖面水分变化曲线分为 3 个阶段，第 1 阶段、第 2 阶段与 $t=50$ d 时一致，第 3 阶段含水率随着深度的增加逐渐减小，说明此次降水不能直接作用到整个阻隔土壤层，出现了反应滞后现象. 25 cm 以上的土层含水率变化一致，说明此处的土壤含水率对边界补给的反应敏感.

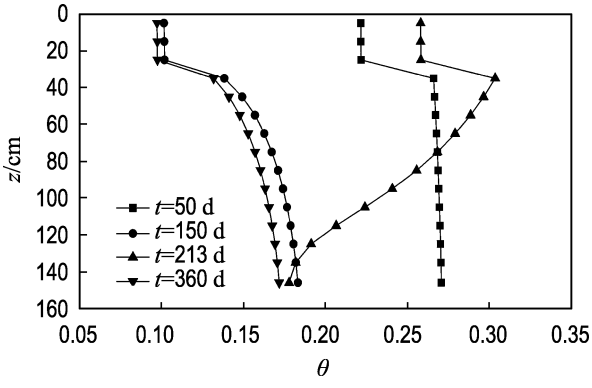


图 5 ET 封顶不同时间的土壤剖面含水率

Fig. 5 Moisture contents profiles at various time of evapotranspirative cover

3.2 参数分析

3.2.1 降水强度和持续时间 降水强度和持续时间对土壤润湿锋的影响如图 6、7 所示.

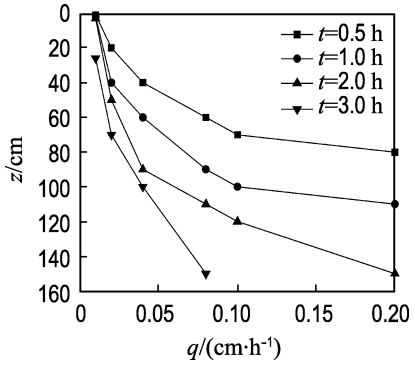


图 6 降水强度对土壤润湿锋的影响

Fig. 6 Depth of wetting front as function of precipitation rate

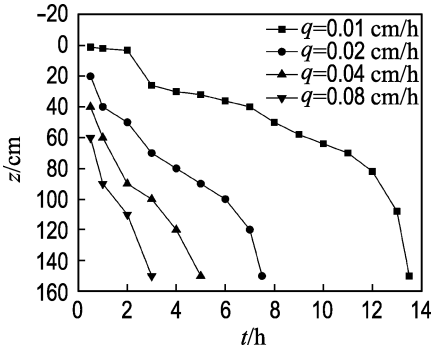


图 7 降水持续时间对土壤润湿锋的影响

Fig. 7 Depth of wetting front as function of precipitation duration

图 6 中降水强度为 0.01～0.20 cm/h，持续时间为 0.5、1.0、2.0 和 3.0 h. 当降水强度为 0.01 cm/h 时，持续 3 h 后湿润锋仍未穿透植物生长层；降水强度为 0.08 cm/h，持续 3.0 h 后穿透阻隔土壤层；降水强度为 0.20 cm/h，持续 2.0 h 后穿透阻隔土壤层. 降水强度为 0.01～0.04 cm/h，对土壤湿润锋的影响敏感，此后影响相对平缓. 图 7 中降水强度分别为 0.01、0.02、0.04、0.08 cm/h，持续时间为 0.5～13.5 h. 降水强度为 0.01 cm/h 时，降水持续时间对土壤润湿锋的作用曲线大致可以分割为 3 个阶段. 0.5～2.0 h 为第 1 阶段，此阶段降水持续时间对润湿锋的影响迟钝；2.0～3.0 h 出现了跳跃，润湿锋从 3 cm 突变到 26 cm；3.0～13.5 h 为第 3 阶段，润湿锋随着降水持续时间的延续，缓慢向土层深部发展直至穿透阻隔土壤层. 降水强度为 0.02、0.04、0.08 cm/h，这种现象不明显，是由于随着降水强度的增大，润湿锋向土层深部发展的速度比较快.

3.2.2 阻隔层厚度 阻隔土壤层的厚度分别为 138、165、183、201 和 220 cm，降水强度为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 cm/h. 降水持续时间与穿透阻隔土壤层厚度的函数关系如图 8 所示. 从图 8 可以分析得出，降水持续时间与穿透阻隔土壤层厚度的关系近似为一次函数，且随着降水强度的增加，其函数的斜率逐渐增大，说明随着降水强度的增大，其持续时间对水分穿透阻隔层厚度的影响越灵敏. 降水强度为 0.1 cm/h，需持续降水 6.2 h 才能穿透 220 cm 厚的阻隔层；降水强度为 0.2 cm/h，降低到 3.5 h；降水强度增大到 0.4 cm/h，只需 2.0 h 就可以穿透. 以上分析说明 ET 封顶

系统不适于常出现强降水的地区.

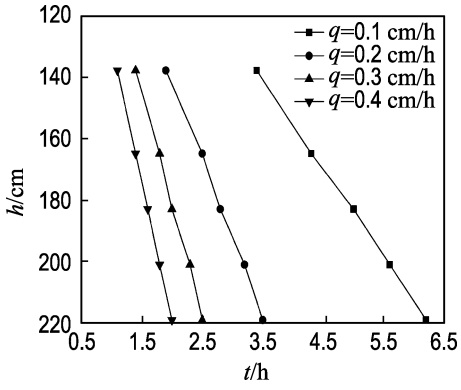


图 8　降水持续时间与穿透阻隔土壤层厚度的关系

Fig. 8　Barrier soil layer thickness as function of breakthrough event duration

3.3　模型的验证

通过对计算结果和文献[12]中的试验数据进行对比，进而对模型的可靠性进行验证. 土壤的参数：$K_s=2.0$ cm/h；$\alpha=0.015$ cm^{-1}；$\beta=1.875$；$\gamma=0.467$；$\theta_r=0.08$；$\theta_s=0.43$. 降水强度为 0.8 cm/h，持续时间为 20 h. 初始体积含水率为 0.12，边界条件为上边界是降水入渗边界，下边界是自由排水边界. 数值计算结果和试验数据的对比如图 9 所示.

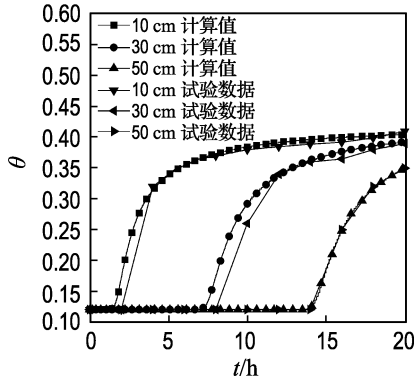


图 9　计算值和试验数据对比图

Fig. 9　Contrast plot between modeling value and experiment data

从上图可以观察到，计算结果和试验数据基本吻合，并且逐渐接近最大含水率值，数值未出现振荡和弥散的现象，从而验证了模型的可靠性.

4　结果讨论与结论

在考虑降水和蒸发的边界条件下，建立了水汽在 ET 封顶系统中迁移的数学模型. 以 1976 年大连市降水和蒸发情况为边界条件，模拟了 1 a 内 ET 封顶系统中水分的变化情况. 模拟结果表明植物生长层中水分受降水和蒸发及土壤水力传导系数的影响比较显著，阻隔层所受影响相对较小，并且随着土壤深度的增加表现出明显的峰值滞后现象，且未达到饱和状态，说明植物生长层为 30 cm，阻隔层为 120 cm 的 ET 封顶系统是比较安全的，完全可以抵御大连近 48 a 以来的最大强降水的冲击. 对降水强度、降水持续时间以及阻隔层厚度 3 个参数进行了参数分析. 数值计算结果与试验数据对比结果表明计算值和试验数据基本吻合，验证了模型的可靠性. 本文的研究成果为建造垃圾填埋场的 ET 封顶系统提供了理论依据.

参考文献：

[1] FORMAN A D, ANDERSON J E. Design and performance of evapotranspiration caps [J]. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, ASCE**, 2005, **9**(4):263-272

[2] WITT K J, ZEH R M. Cracks due to desiccation in cover lining system phenomena and design strategy [C] // **International Workshop: Hydro-Physico-Mechanics of Landfills**. France: Lirigm, Grenoble 1 University, 2005

[3] SCHNABEL W, LEE W, BARNES D L. A numerical simulation of evapotranspiration cover performance at three cold-region locations [C] // **World Water and Environmental Resources Congress**. Florida: ASCE, 2005

[4] WAYLLACE A, LIKOS W J. Numerical modeling of artificial soil as an evapotranspirative cover [C] // **Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils**. Carefree: ASCE 2006:646-657

[5] KELSEY J A, KAY J T, ANKENY M, *et al*. Darcian flux estimations in evapotranspiration landfill covers [C] // **Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils**. Carefree: ASCE 2006:730-740

[6] MCCARTNEY J S, ZORNBERG J G. Decision analysis for design of evapotranspirative landfill covers [C] // **Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils**. Carefree: ASCE 2006: 694-705

[7] SOMASUNDARAM S, LAFOUNTAIN L, ANANTHANATHAN J. Performance monitoring and model verification for an evapotranspirative cover [C] // **Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress**. Austin: ASCE, 2005: 1-12

[8] WARRICK A W. **Soil Water Dynamics** [M]. New York: Oxford University Press, 2003

[9] EI-KADI A I. Validity of the generalized Richards equation for the analysis of pumping test data for a coarse-material aquifer [J]. **Vadose Zone Journal**, 2005, **4**: 196-205

[10] LEHMANN F, ACKERER P H. Comparison of iterative method for improved solutions of the fluid flow equation in partially saturated porous media [J]. **Transport in Porous Media**, 1998, **31**(3): 275-292

[11] 王玲玲,邹耀仁,隋洪起. 对大连历年汛期起止日期的客观判定[J]. 气象, 2000, **26**(3): 12-15

[12] 薛 强,徐应明,刘建军. 降雨入渗对填埋场土壤水分动力学行为的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, **23**(5): 618-620

Numerical simulation of moisture balance in evapotranspiration landfill cover

LU Hai-jun[*1,2], LUAN Mao-tian[1,2], ZHANG Jin-li[1,2]

(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: The compacted clay cover systems of landfills were studied for desiccation cracks (dry crack or thowing crack for climate). The mechanism of a new type of evapotranspiration cover was analyzed to promote the engineering performance. On the basis of considering precipitation and evaporation, a one-dimensional dynamic model was developed for simulating moisture transport in evapotranspiration landfill cover. Volumetric water content was simulated based on the data of precipitation and evaporation of Dalian in 1976. Result of simulation is analyzed. It is apparent that the moisture content near the surface is highly sensitive to climate loading, but the effect is significantly attenuated and time-lagged along with increasing depth. Moisture content of barrier soil layer is partially saturated. Evapotranspiration landfill cover (thickness: 150 cm)is absolutely able to resist strong precipitation which is the heaviest one in 48 a of Dalian. Parametric analyses are conducted to simulate variations in precipitation rate, precipitation event duration and barrier soil layer thickness. The experimental data are used to provide a quantitative verification of the model. The model simulations are compared with the data, which reasonably agree with model simulation. The simulation model provides scientific evidence for building evapotranspiration landfill cover.

Key words: evapotranspiration; landfill; cover system; moisture content