

基于渗流-压缩耦合作用的填埋场渗沥液导排量分析

柯瀚^{1,2}, 陈晓哲^{1,2}, 陈云敏^{1,2}, 兰吉武^{1,2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 目前, 渗滤液的导排量分析通常采取水文分析方法或经验公式获得, 不考虑由于填埋体的压缩引起的排出, 从而低估渗滤液导排量或难以估计封场后渗滤液的产生情况。采用有限元软件模拟填埋体压缩及饱和-非饱和渗流过程, 考虑了填埋体渗透系数由于压缩发生的改变而变化, 分析了各堆填阶段的渗滤液导排量。研究了初始含水率、压缩性、降雨强度等对渗滤液导排量的影响, 并和现场实测数据进行了对比验证。结果表明: 垃圾初始含水率、压缩性、降雨强度是决定渗滤液导排量的主要因素, 垃圾初始压缩指数 C_c 为 1.31 时的渗滤液导排量比不考虑压缩堆填期间的渗滤液导排量提高了 26.0%; 分区填埋作业时, 渗滤液导排较小, 且随时间波动较小。

关键词: 填埋场; 渗滤液导排量; 压缩性; 垃圾初始含水率; 分层堆填

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)09-1634-08

作者简介: 柯瀚 (1975-), 男, 浙江丽水人, 博士, 教授, 主要从事基础工程和环境土工方面的研究。E-mail: boske@126.com。

Calculation of leachate drainage volume of landfills based on seepage-compression coupling action

KE Han^{1,2}, CHEN Xiao-zhe^{1,2}, CHEN Yun-min^{1,2}, LAN Ji-wu^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: At present the hydrological analysis method or empirical formula is usually used in leachate drainage volume analysis. The leachate drainage volume is underestimated since the leachate generation induced by the compression of MSW is not taken into account in these methods. Also, the leachate generation after field sealing cannot be obtained or it may be underestimated. By means of FEM, the compression of MSW and the seepage of leachate in landfill are simulated, and a numerical analysis method is proposed to calculate the leachate drainage volume for each filling stage with time. The variation of saturated hydraulic conductivity of MSW with compression is taken into consideration in the analysis procedure. The influences of the initial moisture content, compressibility and precipitation on the leachate drainage volume are studied and verified by use of the field measured data. The results show that the initial moisture content of waste, compressibility and precipitation are the main factors to determine the leachate drainage volume. The leachate drainage volume of MSW whose initial compression index is 1.31 is increased by 26.0% than that of MSW whose compression index is 0 in the landfill period. The leachate generation is smaller and has an easy curve when the zoning landfilling is taken.

Key words: landfill; leachate drainage volume; compressibility; initial moisture content of waste; multi-layered landfill

0 引言

中国很多填埋场渗滤液实际产量远高于设计值^[1], 一方面导致污水处理厂的设计处理规模严重不足, 大量渗滤液直接排出, 造成极大的污染; 另一方面造成渗滤液导排设施实际负荷大, 淤堵加快, 进而引起堆体水位的雍高, 带来稳定安全问题。

国外较常用的渗滤液导排量分析工具是 U.S. EPA 的 HELP 模型^[2], 它是依据填埋场水量平衡所开发的一个水文模拟软件, 将垃圾渗滤液的来源分为降雨入

渗和垃圾自身水分两部分, 其渗流模型是建立在达西定律基础上的。Peyton 等对多个填埋场的渗滤液产量进行了计算, 结果表明 HELP 模型可以较好的模拟长期 (如几年) 的渗滤液产量, 但短期内 (如几天) 的渗滤液产量预测误差很大^[3], 同时它也不能计算封场

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2012CB719801); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2012AA062601-1); 国家自然科学基金项目 (50978229)

收稿日期: 2012-10-18

后的渗沥液导排量。此后, Ahmed 等^[4]采用饱和-非饱和渗流理论, 提出了 FILL 模型, 其垃圾渗沥液的来源与 HELP 模型类似, 过程中不考虑填埋场分层堆填时垃圾压缩引起的持水特性、饱和渗透系数的变化, 因此无法准确模拟填埋场中的水位和渗沥液产生情况。Khanbilvardi 等^[5]对 Fresh kills 填埋场内一个填埋单元 1983 年的渗滤液产量进行了计算, 并与 HELP 模型进行了比较, 结果表明, FILL 模型比 HELP 模型精确, 但其计算结果与实测数据仍有较大误差。

国内学者针对渗沥液导排量的研究有: 王学华等^[6]、黄志中等^[7]学者认为在进行渗滤液产量计算时, 垃圾自身产生水量可以忽略。规范^[8]只考虑了降雨入渗量, 并忽略渗流的过程, 兰吉武等^[1]的研究表明该算法低估了渗沥液导排量。孙钥等^[9]指出, 在进行渗滤液导排量计算时, 发达国家垃圾含水率低, 忽略垃圾自身产生水量是合理的; 而中国填埋场初始含水率高, 不应忽略这部分水量, 但未提出具体的计算方法。规范 2^[10]考虑田间持水量随深度的变化, 采用不同深度处的实测田间持水量作为计算参数, 但是不考虑渗流过程, 认为垃圾中大于田间持水量的水瞬间转化为渗沥液, 这跟实际填埋场中存在高水位等现象不符^[1]。

总体来说, 目前渗沥液的产量分析方法均不考虑垃圾的堆填压缩过程及与其相关的渗流场时空变化。本文基于饱和-非饱和渗流理论和非线性固结理论, 考虑分层堆填过程及填埋体渗透系数随深度的变化, 计算了各阶段渗沥液导排量, 并用现场实测数据进行了验证; 通过多参数对比分析, 研究了各因素对渗沥液导排量的影响规律, 并对实际工程提出了改进措施。

1 渗沥液产生机理

渗沥液是垃圾在堆放和填埋过程中由于压实、发酵等物理、生物、化学作用, 同时在降水和其他外来水的渗流作用下产生的含有机或无机成份的液体^[8]。如图 1 所示, 在不考虑地下水补充的前提下, 渗沥液导排量包括两部分: 垃圾自身水分释放和降雨入渗。堆填初期的垃圾处于非饱和状态, 超出田间持水量的孔隙水首先在重力作用下向下运移; 堆填过程中, 下层垃圾发生压缩, 孔隙比减小, 进而引起垃圾持水能力降低^[11], 大量孔隙水因而向下运移形成渗沥液。在整个填埋过程中, 大气降雨在垃圾堆体表面发生蒸发和径流, 部分渗入填埋场, 在重力作用下向下运移形成渗沥液。

与一般土体不同, 垃圾中存在大量有机物, 进入填埋场后, 先后发生了好氧降解和厌氧降解。前者是一个十分短暂的过程(两周左右), 在填埋场垃圾降解

中起次要作用, 而后者——厌氧降解阶段起主要作用。降解过程中伴随着各种物质生成 H_2O 或者消耗 H_2O 。在好氧降解阶段, 大分子有机物在各种胞外酶的作用下分解为小分子的有机物, 该过程是产水的。对起决定作用的厌氧降解阶段: 黄涛等^[12]通过对化学方程式进行了推导计算, 结果表明在厌氧反应的 3 个阶段中, 1 g 碳对应的可降解有机物在水解阶段和酸化阶段共消耗 0.459 g 的 H_2O , 在产甲烷阶段有部分水生成, 其量不确定。何丹^[13]认为厌氧降解耗水, 并且给出了理想状态下每立方米垃圾降解消耗水量。周德庆等对微生物的研究表明大多数微生物需要在有水的条件下进行无氧呼吸, 基本不产水^[14]。总体上目前的研究倾向于认为厌氧降解不产水或者耗水, 考虑到好氧降解产生少量水, 简便起见, 本文忽略有机物降解(不含 H_2O)生成/消耗的水量。

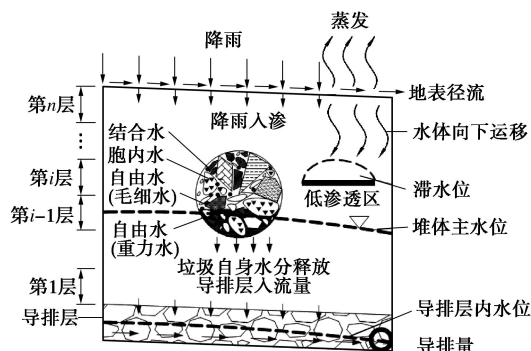


图 1 垃圾水分存在形式及运移示意图

Fig. 1 Existence form and migration of waste water

2 计算模型与控制方程的建立

填埋场现场作业是分层堆填进行的, 图 2 给出了堆填至第 n 层时的计算示意图。假设: 降雨入渗量为 q_{in} , 渗沥液导排量为 q_{out} , 第 1 层~第 n 层垃圾的厚度为 $H_1 \sim H_n$, 第 1 层~第 n 层垃圾的弹性模量为 $E_1 \sim E_n$, 第 1 层~第 n 层垃圾的孔隙比为 $e_1 \sim e_n$, 体积含水率为 $\theta_1 \sim \theta_n$, 垃圾的非饱和渗透系数为 k_w , 垃圾的饱和渗透系数 k_s 。

建立控制方程:

垃圾中同时包含了固、液、气三相, 基本控制方程, 即力学平衡方程与水、空气质量守恒方程如下:

$$\frac{\partial(\sigma_{ij} - \delta_{ij} u_a)}{\partial z_j} + \frac{\partial u_a}{\partial z_j} + b_i = 0 \quad , \quad (1)$$

$$(\rho_w n S_r)_{,t} + (\rho_w v_{wi})_{,i} = 0 \quad , \quad (2)$$

$$[\rho_a n(1 - S_r + H S_r)]_{,t} + [\rho_w (v_{ai} + H v_{wi})]_{,i} = 0 \quad , \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为总应力, δ_{ij} 为克罗内克常数, u_a 为孔隙气压力, b_i 为体积力, ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气密度, n 为孔隙率, S_r 为饱和度, v_{wi} 和 v_{ai} 分别为水和空气

速度, H 为亨利系数, 下脚标 t 和 i 分别为对时间 t 求导和对坐标 z_i 求导。忽略空气相, 则土体密度 ρ 仅是固液两相密度与孔隙率 n 的函数, 有

$$\rho = (1-n)\rho_s + nS_r\rho_w \quad (4)$$

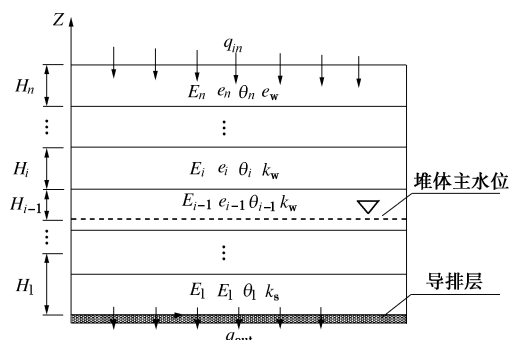


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

将应力场和渗流场进行耦合求解, 过程如下:

采用 Galerkin 有限元格式, 将节点位移和孔隙水压力作为节点自由度进行空间离散, 则力学平衡方程及渗流连续方程可写成如下矩阵形式:

力学平衡方程为

$$[K]\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} \quad (5)$$

式中, $[K]$ 为通常的刚度矩阵, $\{\Delta\bar{\delta}\}$ 为位移增量, $[L]$ 节点孔隙水压力所对应的节点力, $\{\Delta\bar{p}\}$ 为孔隙水压力增量, $\{F\}$ 为节点外荷载, $\{I\}$ 为增量迭代过程中上一增量步中的不平衡力。

渗流连续方程为

$$[\hat{B}]^T\{\bar{v}\} + [\hat{H}]\{\bar{p}\} = \{Q\} \quad (6)$$

式中, $[\hat{B}]$ 自为节点变形率对应的体积改变率, $\{\bar{v}\}$ 为 $\{\bar{\delta}\}$ 对时间的导数, $[\hat{H}]$ 为孔压变化对应的体积改变率, $\{\bar{p}\}$ 为孔隙水压力, $\{Q\}$ 为节点流量。

引入时间积分对渗流方程进行变形, 可得到耦合方程组为

$$\begin{aligned} [K]^T\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} &= \{F\} - \{I\} - \\ [B]^T\{\Delta\bar{\delta}\} - \Delta t[H]\{\Delta\bar{p}\} &= \{R\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\{R\} = \Delta t[-\{Q\}_{t+\Delta t} + [\hat{B}]^T\{\bar{v}\}_{t+\Delta t} + [\hat{H}]^T\{p\}_{t+\Delta t}]$ 为流体体积变化修正量, $[B]$ 为节点变形对应的流体体积改变, $[H]$ 为孔压变化对应的流体体积改变。

在渗流-应力场耦合求解过程中, 在一个时间步长 Δt 内方程 (7) 形成了迭代求解基础。它还需满足位移边界条件及渗流边界条件。

本文在模拟分层堆填时的计算流程如下。

第 1 堆填阶段: 建立第 1 层垃圾的计算模型, 划分网格。将垃圾各项参数的初始值赋予第 1 层垃圾, 施加重力荷载, 求得阶段末堆体厚度及各节点的孔压、孔隙比和应力值, 导出各网格质心处的孔压、孔隙比和应力值作为下一堆填阶段的初始值。第 2 堆填阶段:

建立两层垃圾的计算模型, 其中第 1 层垃圾厚度为第 1 堆填阶段所求得, 第 2 层垃圾厚度取初始厚度。划分网格时, 两层垃圾的网格数目均与第 1 堆填阶段第 1 层垃圾保持一致。取上一阶段末第 1 层垃圾中点处的孔隙比和应力值, 依据规范 2 的式 5.2.2-2 确定本阶段第 1 层垃圾的压缩指数, 连同上一步导出的该层垃圾各网格质心的孔压、孔隙比和应力值一起赋予第 1 层垃圾, 同时将垃圾各项参数的初始值赋予第 2 层垃圾。计算时, 首先对下覆垃圾进行地应力平衡, 再对第 2 层垃圾施加重力荷载, 求出该阶段末堆体各节点的孔压, 位移及其余各项参数, 导出各网格质心处的孔压、孔隙比和应力值作为下一堆填阶段的初始值..., 如此对分层堆填过程进行模拟。需说明的是, 荷载均为线性施加。

3 垃圾的水力特性和持水特性

3.1 垃圾的饱和渗透系数

垃圾的饱和渗透系数是影响渗沥液运移的重要参数^[15-16], 同时也与其组成、孔隙比、龄期等密切相关^[17]。王文芳^[18]将组分及物理指标一致的自制垃圾在适宜条件下进行加速降解, 采用大尺寸三轴渗透试验测试了不同降解龄期自制垃圾在不同应力条件下的饱和渗透系数。试验结果表明: 孔隙比为 2.2 时, 三轴饱和渗透系数约为 5×10^{-4} cm/s; 在围压作用下, 当孔隙比降低到 1.5 时, 渗透系数下降到约为 6.0×10^{-6} cm/s, 孔隙比减少为初始的 2/3, 渗透系数降低近 3 个指数级; 降解龄期从 3 个月到 12 个月, 对于孔隙比为 2.2 垃圾试样渗透系数从 8.78×10^{-5} cm/s 下降到 5.12×10^{-5} cm/s; 孔隙比为 1.7 垃圾试样渗透系数则从 9.27×10^{-6} cm/s 下降到 6.17×10^{-6} cm/s。因此: 孔隙比对饱和渗透系数影响十分明显, 降解对垃圾饱和渗透系数的影响相对较小, 本文进行非线性固结计算时采用其给出的降解龄期为 3 个月的垃圾的 k_s-e 曲线, 见图 3。

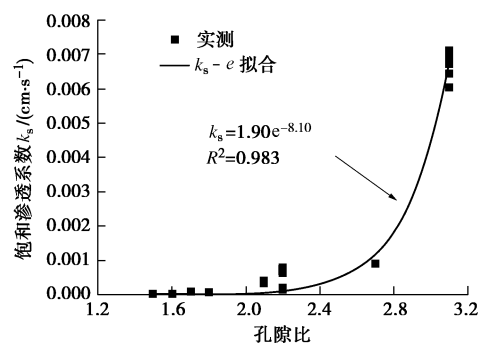


图 3 渗透系数随孔隙比的变化曲线^[18]

Fig. 3 Variation of hydraulic conductivity with void ratio^[18]

3.2 垃圾的持水特性

(1) 垃圾的持水曲线

城市生活垃圾的持水曲线是垃圾填埋场水气运移分析的重要参数,它反映了垃圾在不同基质吸力作用下的持水能力的大小。比较常用的公式有 Brooks-Corey(1964)模型, Gardner(1970)模型, Van Genuchten(1980)模型和 Campbell 模型(1974)等,前3个模型的参数较多,均假设了残余含水率 θ_r 为常数。考虑到本文需要模拟分层堆填的过程,残余含水率 θ_r 不断变化,因此前3种模型不适合于本文的耦合计算,因此本文采用如下表达式^[19]:

$$\psi(\theta) = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}, \quad (8)$$

式中, ψ_e 是垃圾进气值水头, θ 为体积含水率, b 为 Campbell 参数, θ_s 是饱和体积含水率, θ/θ_s 其在数值上等于垃圾体的孔隙率,即为饱和度 S_r 。

以 ψ 为自变量, S_r 为因变量,式(8)可化为

$$S_r = \psi_e^{1/b} \psi^{-1/b}. \quad (9)$$

兰吉武^[20]对国内相关研究文献进行总结,得出了填埋深度从浅至深、不同龄期的垃圾持水曲线,如图4。运用式(9)对图4中文献[20]的数据进行拟合,拟合参数如下: $\psi_e = 0.21$ kPa, $b = 7.17$ 。拟合曲线从数据点的中间区域穿过,整体误差不大。

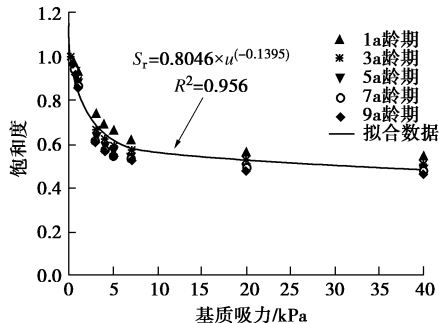


图4 垃圾饱和度-基质吸力关系曲线^[20]

Fig. 4 Degree of saturation-matrix suction curves of MSW

持水曲线一般采用体积含水率作为 y 坐标,由于不同深度垃圾孔隙比不同,其持水曲线难以统一表达。因此本文采用饱和度作为 y 坐标,当求得孔压/基质吸力之后,便可由持水曲线确定垃圾的饱和度,进而结合孔隙比确定其体积含水率。通过这一方式,实现了在不同深度处持水曲线随堆填过程的更新。

(2) 垃圾的田间持水量

田间持水量可定义为:在长期的重力排水条件下垃圾持有的体积含水率 θ_w ,一般采用 10~33 kPa 基质吸力对应的体积含水率 θ_w ^[21-22]。

以垃圾的孔隙比为 3.0 时为例(大约相当于 5 m 深度处的垃圾),根据图4的拟合曲线确定其田间持水量:若采用 33 kPa 气压力,为 37.1%;若采用 10 kPa

气压力,为 43.8%,本文将两者的平均值 40.4%作为下文的计算参数。近似取颗粒比重为 1.78^[11],可求得田间持水量对应的湿基质量含水率为 47.6%,这与兰吉武基于试验资料的预测结果 48%比较接近^[20]。

3.3 垃圾的非饱和渗透系数

基于 3.2 节拟合所得的持水曲线,运用 Campbell^[19]公式预测垃圾的非饱和渗透系数,

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}, \quad (10)$$

式(10)可以写为

$$K(\theta) = K_s S_r^{(2b+3)}. \quad (11)$$

定义 $K(\theta)/K_s$ 为相对渗透系数,拟合得到的相对渗透系数与饱和度的关系如图5。当饱和度从 1 下降至 0.8,非饱和渗透系数缓慢下降,饱和度小于 0.8 时,非饱和渗透系数迅速下降。

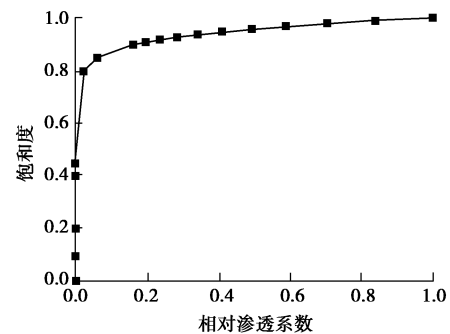


图5 相对渗透系数预测结果

Fig. 5 Predicted results of relative permeability coefficient

4 算例分析与方法验证

为了对本文方法进行初步分析和验证,针对导排层完全淤堵和导排良好两种工况进行计算。堆填区域底面积设为 1 m²,服役期间每 1 a 作为一个堆填阶段,每个堆填阶段堆填 5 m 厚的垃圾,共堆填 10 a。参数取值如下:垃圾初始含水率为 50%,初始压缩指数为 1.31,初始孔隙比为 3.0,年降雨入渗量为 430 mm。

图6给出了两种工况下堆体总厚度和水位高度随时间的变化曲线。由图6可知:堆填过程中填埋体不断被压缩,堆填结束时导排层完全淤堵和导排良好这两种工况的填埋高度分别为 41.49 m 和 38.60 m。当导排层完全淤堵时,水位高度跟随堆体高度快速上升,第9年时(堆高约为 37 m)水位上升至堆体顶部。当导排良好时,开始阶段由于底部渗透系数较大,5 a 以后填埋体中才开始形成积水,填埋过程中沉降量较淤堵时大。由此可知,导排层服役性能良好对于降低填埋体内部水位,增加单位面积填埋量都有重要的意义。

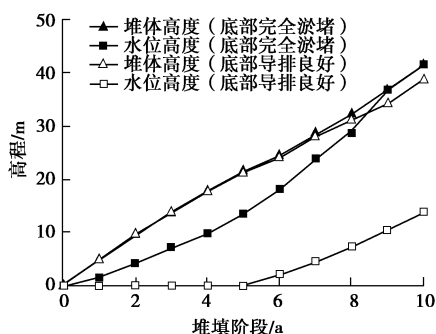


图6 导排层完全淤堵和导排良好时的对比

Fig. 6 Comparison between clogging and little clogging

为了验证本文方法在堆填过程中是否满足水量平衡,笔者计算出堆填各阶段的降雨入渗累积量、垃圾初始含水累积量、渗沥液排放累积量和堆体残存水总量,以第10年时为例,垃圾初始含水累积量为 25.00 m^3 ,降雨入渗累积量为 4.33 m^3 ,渗沥液排放累积量为 10.12 m^3 ,堆体残存水总量为 19.40 m^3 。最终垃圾自身含水累积量和降雨累积量之和为 29.33 m^3 ,渗沥液排放累积量和堆体残存水总量之和为 29.52 m^3 ,两者基本一致,即本文方法满足水量平衡的条件。

5 参数分析

与前面案例相同,不特别指明时参数取值如下:初始含水率为50%,初始压缩指数为1.31,初始孔隙比为3.0,年降雨入渗量为430 mm。

5.1 初始含水率的影响

垃圾初始含水率为初始填埋垃圾水分质量(体积)与总质量(体积)的比值。图7为国内外垃圾初始含水率的统计。国内7个不同地区填埋垃圾的初始含水率从30%~58%不等,平均值为50%;美国、英国和法国6个地区填埋垃圾初始含水率在21%~37%范围内,平均值为29%。

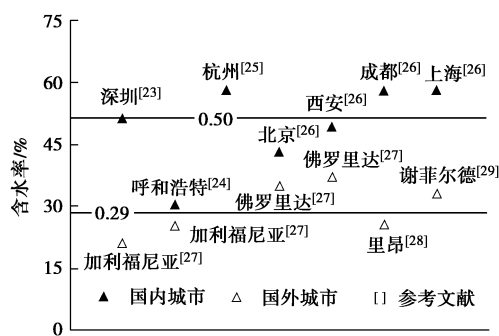


图7 国内外垃圾初始含水率

Fig. 7 Initial moisture content of worldwide MSW

本文计算了初始含水率分别为29%,50%时各堆填阶段的垃圾渗滤液产量,并且与HELP模型和规范

2(《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ176—2012),下同)的计算结果进行了对比。在运用HELP模型计算时,田间持水量取为40.4%,见3.2节;运用规范2计算时,根据参考文献[1]提供的现场不同深度取样的实测统计数据,确定填埋龄期为1 a(2 m深)、3 a(13 m深)、5 a(23 m深)、7 a(33 m深)、9 a(43 m深)垃圾的田间持水量分别为40%,34%,32%,30%和29%,其他年份采用线性插值法确定。计算结果见图8。

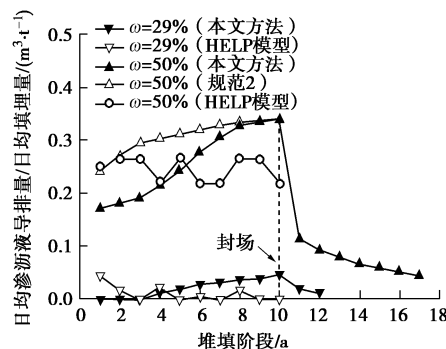


图8 含水率对渗沥液导排量的影响

Fig. 8 Influence of moisture content on leachate drainage volume

采用本文方法时,在堆填期间(1~10 a),两种初始含水率的垃圾日均渗沥液导排量/日均填埋量的平均值分别为2.23%和26.0%;采用规范2的方法时,初始含水率为50%的垃圾日均渗沥液导排量/日均填埋规模的平均值为30.9%,大于本文方法的计算结果,这是由于规范2的方法不考虑渗流过程,认为超出田间持水量的水瞬时全部排出,而本文方法考虑了渗流过程。若计入封场后的渗沥液产量,由于本文方法考虑了压缩过程,计算所得的总产量略大于规范2。

采用本文方法时,1~3 a期间,初始含水率为50%的垃圾渗沥液导排量(m^3)的数值为填埋量(t)的17.1%~19.2%,第3年之后,渗沥液导排量快速上升,最终达到了填埋量的34.1%。HELP模型不考虑分层堆填过程垃圾的压缩,主要反映的是降雨量引起的渗沥液变化,无法反映渗沥液产量随着堆填的进行而升高的趋势。

5.2 压缩特性的影响

运用本文方法计算了初始压缩指数 C_c 分别为0(不考虑压缩),0.92和1.31时各堆填阶段的垃圾渗滤液产量,同时运用HELP模型计算了不考虑压缩时的渗滤液导排量,计算结果见图9。采用本文方法时,在堆填期间,压缩性不同的垃圾对应的日均渗滤液导排量/日均填埋量的平均值分别为20.5%,24.1%和26.0%, $C_c=0.92$ 和1.31的垃圾渗滤液导排量分别比 $C_c=0$ 时提高了18%和26%,垃圾压缩对渗滤液导排量

的影响较大, 压缩性越高, 渗沥液导排量越大。

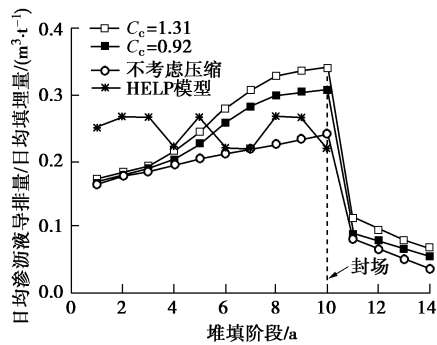


图9 压缩性对渗沥液导排量的影响

Fig. 9 Influence of compressibility on leachate drainage volume

HELP 模型相应的计算结果为 24.6%, 不反映渗沥液产量随着堆填的进行而升高的趋势, 因此有可能低估堆填后期的渗沥液产量。若以 HELP 模型计算结果为设计参照, 会导致污水处理厂的设计处理能力不足。这也验证了 Peyton 等依据实测结果得出的结论——虽然 HELP 模型计算的水量从长期平均来说基本准确, 但短期内的渗沥液产量预测误差很大^[3]。

5.3 降雨的影响

中国幅员辽阔, 气候差别较大。笔者计算了 3 种典型的降雨强度——年降雨量分别为 400 mm (中西部)、1000 mm (长江中下游) 和 1600 mm (华南地区) 的渗沥液导排量。参照相关文献及工程实际数据^[1, 8, 10, 20], 针对一般工况, 扣除径流量和蒸发量, 年降雨入渗量分别取为 170, 430 和 670 mm。计算结果见图 10。

在堆填期间, 4 种降雨入渗量对应的日均渗沥液导排量/日均填埋量的平均值分别为 20.4%, 22.0%, 26.0% 和 30.8%, 年降雨入渗量分别为 170, 430 和 670 mm 时, 由降雨产生的渗沥液占渗沥液总产量的 7.4%, 21.5% 和 36.0%。因此, 对于中国南方大部分地区, 降雨引起的渗沥液导排量相当可观, 应采取临时覆盖、雨污分流等措施以减小降雨入渗量。

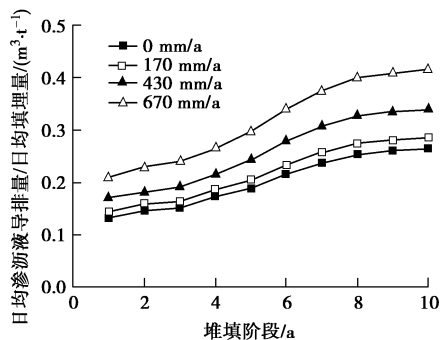


图10 降雨对渗沥液导排量的影响

Fig. 10 Influence of precipitation on leachate drainage volume

5.4 分区堆填的影响

如果将填埋区均分为两个堆填区域——第 1 分区和第 2 分区, 见图 11 右下角示意图。先在第一分区作业, 日均填埋量与不分区时相同。待第 1 分区堆填高度达到 50 m (初始高度) 时, 进行覆盖, 即刻开始第 2 分区的作业。由于作业面积减小为原来的一半, 每年堆填的高度假设为原来的 2 倍, 即 10 m/a。

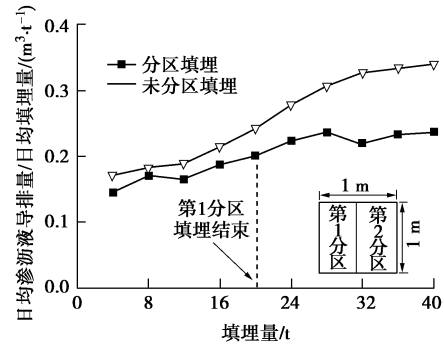


图11 分区堆填对渗沥液导排量的影响

Fig. 11 Influence of zoning landfilling on leachate drainage volume

图 11 给出了分区堆填对渗沥液导排量的影响。不分区堆填时, 日均渗沥液导排量/日均填埋量为 17.1%~34.1%, 平均值为 26.0%; 当分区堆填时则为 14.5%~23.8%, 平均值为 20.3%。分区堆填时渗沥液导排量较小, 且较平稳, 这是因为分区堆填时, 作业面积减小, 降低了降雨入渗量。因此, 应尽可能控制填埋作业面, 分区堆填, 以减小污水处理厂的负荷。

6 实例计算

根据上海某垃圾填埋场工程 2005 年 3 月~2010 年 12 月的实测资料, 结合其他算法, 对本文算法进行了对比验证。计算所用参数如下: 填埋场底部面积约为 $20 \times 10^4 \text{ m}^2$, 实测初始湿基含水率为 54%, 实测垃圾颗粒比重为 1.7; 初始重度为 7.8 kN/m^3 , 初始孔隙比为 3.74, 初始压缩指数取 1.31。根据本课题组研究成果^[1], 确定降解后的田间持水量为 34%; 据统计, 该地区平均年降雨量为 1178 mm, 估算得年入渗量为 815 mm。运用 HELP 模型和本文方法建模时, 由填埋量/(初始密度×堆填面) 来确定各阶段堆填高度。计算结果见图 12。

在 2005 年 3 月至 2010 年 12 月期间, 填埋场日均填埋量 6737 t/d, 实测日均渗滤液产量为 $1995 \text{ m}^3/\text{d}$, 渗滤液产量与日均填埋量比值为 29.6%。HELP 模型计算得到的日均渗沥液导排量为 $1581 \text{ m}^3/\text{d}$, 占日均填埋量的 23.5%, 小于实测结果, 且无法反映渗沥液导排量随着堆填而快速升高的趋势, 严重低估 2009 年,

2010 年的渗沥液导排量; 规范 1 (《生活垃圾填埋场渗沥液处理工程技术规范》(HJ564—2010)) 的“浸出系数法”计算得到的日均渗沥液产量为 $353 \text{ m}^3/\text{d}$, 仅为填埋规模的 5.2%, 明显偏小; 利用规范 2 计算得到的日均渗沥液产量为 $2333 \text{ m}^3/\text{d}$, 为填埋规模的 34.6%, 比实测结果大, 这是因为其不考虑渗流过程, 高估了渗沥液排放速率; 利用本文方法计算得到的日均渗沥液产量为 $1934 \text{ m}^3/\text{d}$, 为填埋规模的 28.7%, 与实测结果较为接近。

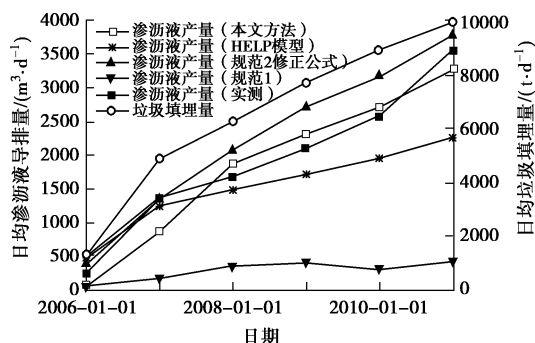


图 12 不同方法的计算结果与实测对比

Fig. 12 Comparison between calculated results by different methods and measured data

7 结论和建议

(1) 目前, 渗沥液的导排量分析通常采取水文分析的方法或不考虑渗流过程的简化公式, 均不能同时考虑垃圾堆填压缩过程和饱和 - 非饱和渗流的情况, 计算结果与实测相比存在较大偏差。本文通过模拟填埋体压缩及饱和 - 非饱和渗流过程, 考虑了填埋体渗透系数随深度的变化, 采用数值分析方法分析了分层堆填时各阶段的渗沥液导排量, 取得了比较理想的结果。

(2) HELP 模型预测短期渗沥液产量时误差较大, 若以其计算结果为污水处理厂的设计参照, 有可能导致设计处理能力不足, 从而污染环境。

(3) 垃圾压缩性对渗沥液导排量影响较大。在匀速堆填期间, 初始压缩指数 C_c 为 1.31 的垃圾和不考虑压缩时相比, 渗沥液导排量提高了 26.0%。垃圾的初始含水率、降雨强度也均对渗沥液导排量有重要影响。分区填埋作业时, 由于作业面较小减少了雨水进入, 渗沥液导排量较小而且平稳。因此, 建议在不影响作业机械使用的前提下, 尽可能控制填埋作业单元的面积, 分区填埋。

(4) 进行固液耦合计算时持水曲线的选用对结果影响较大, 需要进一步开展垃圾持水曲线研究。

参考文献:

- [1] 兰吉武, 詹良通, 李育超, 等. 填埋垃圾初始含水率对渗沥液产量的影响及修正渗沥液产量计算公式[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1389 - 1396. (LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, et al. Impacts of initial moisture content of MSW waste on leachate generation and modified formula for predicting leachate generation[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1389 - 1396. (in Chinese))
- [2] SCHROEDER P R, DOZIER T S, ZAPPI P A, et al. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: engineering documentation for version 3[D]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 1994.
- [3] 万晓丽. 垃圾填埋场导排层渗沥液水位研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (WAN Xiao-li. Numerical study on liquid depth over landfill liner[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [4] AHMED S K, KHANBILVARDI R M, FILLOS J, et al. Two-dimensional leachate estimation through landfills[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, **118**(2): 306 - 322.
- [5] KHANBILVARDI Reza M, AHMED Shabbir, GLEASON Phillip J. Flow investigation for landfill leachate[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, **121**(1): 45 - 57.
- [6] 王学华, 胡玉才, 吴健民. 山谷型垃圾填埋场渗沥液水量计算方法比较研究[J]. 环境与城市生态, 1995, **8**(4): 38 - 41. (WANG Xue-hua, HU Yu-cai, WU Jian-min. Comparative method of quantity balance for valley pattern msw landfill leakage[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 1995, **8**(4): 38 - 41. (in Chinese))
- [7] 黄志中, 弓晓峰. 山谷型垃圾卫生填埋场渗沥液水量计算[J]. 江西化工, 2005, **21**(1): 89 - 92. (HUANG Zhi-zhong, GONG Xiao-feng. Quantity balance for valley pattern msw landfill site leakage[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2005, **21**(1): 89 - 92. (in Chinese))
- [8] HJ564—2010 生活垃圾填埋场渗沥液处理工程技术规范[S]. 2010. (HJ564—2010 Leachate treatment project technical specification of municipal solid waste landfill[S]. 2010. (in Chinese))
- [9] 孙 钊, 李国建. 垃圾渗滤水水量计算中的几个问题[J]. 环境卫生工程, 1998, **6**(4): 139 - 140. (SUN Yao, LI Guo-jian. Several problems about predicting landfill leachate[J]. Environmental Sanitation Engineering, 1998, **6**(4): 139 - 140. (in Chinese))
- [10] CJJ176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 2012. (CJJ176—2012 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill[S]. 2012. (in Chinese))
- [11] 魏海云, 詹良通, 陈云敏, 等. 城市生活垃圾持水曲线的

- 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 712 - 716. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Experimental study on soil water characteristic curve of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 712 - 716. (in Chinese))
- [12] 黄 涛, 李志华. 城市生活垃圾卫生填埋场可生物降解组分降解量化分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. (HUANG Tao, LI Zhi-hua. Quantitative analysis for the biological degradable composition of municipal solid waste[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [13] 何 丹. 垃圾填埋场水分迁移规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (HE Dan. A study on the law of the water/leachate migration in landfill[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Tichnology, 2008. (in Chinese))
- [14] 周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 101 - 119. (ZHOU De-qing. Microbiology tutorials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 101 - 119. (in Chinese))
- [15] 冉 龙. 城市生活垃圾的压缩和渗透特性及填埋场水力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (RAN Long. Study of compression and filtration behaviors of MSW and hydraulic behaviors of landfills[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [16] 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. (LIU Zhao. Experimental study on hydraulic conductivity of municipal solid waste and analysis of pumping vertical well[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [17] KRISHNA R, REDDY, et al. Hydraulic conductivity of MSW in landfills[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(8): 677 - 683.
- [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, 2012. (WANG Wen-fang. Laboratory research on saturated hydraulic conductivity of municipal solid Waste under different degradation age[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [19] CAMPBELL G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Sci, 1974, **117**(6): 311 - 314.
- [20] 兰吉武. 填埋场渗滤液产生、运移及水位雍高机理和控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LAN Ji-wu. Mechanism of leachate generation, transport and mound in MSW landfills and control of leachate level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [21] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo Metropolitan Landfill, Korea[J]. Waste Management, 2002, **22**(3): 261 - 267.
- [22] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传, 等. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan, et al. Soil hydrodynamic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [23] 温俊明, 吴俊锋. 中国城市生活垃圾特性及焚烧处理现状[J]. 上海电气技术, 2009, **2**(1): 43 - 48. (WEN Jun-ming, WU Jun-feng. The characteristics of the MSW in China and its incineration treatment status[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2009, **2**(1): 43 - 48. (in Chinese))
- [24] 赵 吉, 孙卫国, 杨加利, 等. 呼和浩特市城市生活垃圾组成及特性分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2005, **36**(1): 100 - 103. (ZHAO Ji, SUN Wei-guo, YANG Jia-li, et al. Composition and characteristic analysis of municipal solid waste in hohhot city[J]. Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2005, **36**(1): 100 - 103. (in Chinese))
- [25] 倪 娜, 洪国才. 杭州市城市生活垃圾物理化学特性及处置对策[J]. 环境生工程, 2005, **13**(5): 31 - 36. (NI Na, HONG Guo-cai. Physicochemical properties and treatment countermeasure of domestic waste in Hangzhou city[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2005, **13**(5): 31 - 36. (in Chinese))
- [26] 秦宇飞, 白 焰, 王 潇, 等. 北京市朝阳区城市生活垃圾组分分布特性研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(8): 1499 - 1502. (QIN Yu-fei, BAI Yan, WANG Xiao, et al. Distribution characters of municipal solid waste in Chaoyang District of Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(8): 1499 - 1502. (in Chinese)).
- [27] 涂 帆, 钱学德. 中美垃圾填埋场垃圾土的重度、含水率和相对密度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 3075 - 3081. (TU-Fan, QIAN Xue-de. Unit weight, water content and specific gravity of municipal solid waste in China and United States[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 3075 - 3081. (in Chinese))
- [28] BENBELKACEM H, BAYARD R, ABDELHAY A, et al. Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(14): 5206 - 5212.
- [29] PATUMSAWAD S, CLIFFE K R. Experimental study on fluidised bed combustion of high moisture municipal solid waste[J]. Energy Conversion and Management, 2002, **43**(17): 2329 - 2340.