

成层介质中渗滤液最大饱和深度的简易解法

程南军¹, 陈学东²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 江苏 南京 210098)

摘要 基于 McEnroe 给出的衬里上排水层饱和深度的解析解, 分析了垃圾填埋场衬里上渗滤液最大饱和深度和设计参数入流量、排水层渗透系数和衬里坡度之间的函数关系, 给出了渗滤液最大饱和深度及其在衬里上出现位置之间的关系, 分析了衬里坡度对最大饱和深度出现位置的影响。在此基础上给出了在成层介质中适用于扩展 Dupuit 假定的一种简化计算渗滤液最大饱和深度的方法。算例结果表明该方法简单, 便于在工程中使用。

关键词 垃圾填埋场; 衬里; 渗滤液; 最大饱和深度

中图分类号: X705 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2008)06-0024-04

Simplified solution of maximum saturated depth of landfill leachate in layered drainage media//CHENG Nan-jun¹, CHEN Xue-dong² 1. Research Institute of Geotechnical Engineering and Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Hydraulic Engineering Science and Technology Consultation Co., Ltd, Nanjing 210098, China)

Abstract : Functional relationships among maximum saturated depth over the liner and some design parameters, including inflow into landfill leachate, the permeability coefficient of the drainage layer and the slope of the leachate liner, are analyzed based on the McEnroe analytic solution. After obtaining the value of the maximum saturated depth, the position where the maximum saturated depth occurs on the leachate liner is also analyzed, considering the effects of the slope of the leachate liner on maximum saturated depth. Then, a simplified method for calculating the maximum saturated depth in multilayered drainage media is proposed. A case study indicates that this method is very suitable for application in the design of a drainage layer for a landfill.

Key words : landfill; liner; leachate; maximum saturated depth

渗滤液最大饱和深度的计算是垃圾填埋场水力设计中令人关注的问题之一。一般来说, 在垃圾填埋场水力设计中, 需要在渗滤液导流系统和最终覆盖系统中进行渗滤液饱和深度计算。在渗滤液导流系统中, 渗滤液饱和深度的增加会导致衬里被过高水头穿透, 同时对填埋体边坡也会产生不利影响, 最终覆盖系统中水头高度的变化会直接影响到最终覆盖层边坡的稳定性, 而最大饱和深度是反映这一变化的重要指标。美国 EPA 规范限制衬里之上的渗滤液最大饱和深度在 30 cm 以内。影响渗滤液最大饱和深度的因素有排水层入流量、渗滤液排水层的渗透系数、渗滤液由上游界面流经渗滤液收集管的距离、填土衬里的坡度及排水层下游终点处的水力条件等。

Moore 于 1980 年和 1983 年在美国 EPA 的文件中给出了计算衬里上渗滤液水头最大值的计算公式^[1-2], McEnroe^[3]在 1989 年从标准 Dupuit 假设出发给出了衬里上排水层饱和深度的解析解; Giroud

等^[4]给出了衬里上最大淋滤液高度的计算公式, 但并未给出解析解, 只是给出了一个修正公式; McEnroe 在 1993 年基于扩展 Dupuit 假设给出了衬里上排水层饱和深度的解析解^[5], 所提出的方法被认为是目前渗滤液最大饱和深度计算的最好方法。

在排水系统运行良好的情况下, 渗滤液一般被认定只在排水层中流动, 这一情况下渗滤液最大饱和深度一般可以通过公认的 McEnroe 在 1993 年提出的方法求解。但在现实情况下, 经常会出现饱和深度超出渗滤液排水层厚度的情况, 比如在渗滤液排水层发生堵塞的时候。如何考虑在成层介质中渗滤液最大饱和深度的计算方法, 钱学德等^[6-7]和柯瀚等^[8]都提出了各自的计算方法。在浸润面势函数相等理论提出的等效渗透系数的基础上, 钱学德提出成层介质中渗滤液最大饱和深度的计算方法, 但其方法对于排水层堵塞严重的情况计算不够精确; 柯瀚基于标准 Dupuit 假定的方法给出了成层介质中渗滤液饱和深度的迭代方法, 这种方法对于斜坡角度

较大的情况计算不够精确,且通过迭代的计算方法也不易为一般工程技术人员掌握。笔者基于 McEnroe1993 年提出的解析方法,提出了改进的衬里上渗滤液最大饱和深度的计算方法,以便于在工程中使用。

1 单一介质中渗滤液饱和深度计算的基本解析解

一般来说,渗滤液排水层的渗流计算可以简化成图 1 所示的计算模型。该计算模型中主要考虑了渗滤液排水中主要的 4 个影响因子:水平排水距离、降雨入流量、排水层的渗透系数和衬里的边坡角度。图 1 表示的填埋场渗滤液排水系统的浸润线自由面曲线简化计算模型中, L 为最大水平排水距离, α 为衬里坡度, $S = \tan \alpha$, r 为单位表面积入渗量。

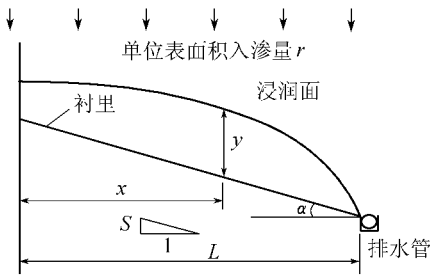


图 1 简化浸润线自由面计算模型

基于扩展 Dupuit 假设,陡坡中自由渗流条件下确定渗滤液排水层饱和深度的支配公式为^[5]

$$ky\left(\frac{dh}{dx} - \tan \alpha\right) \cos^2 \alpha + rx = 0 \tag{1}$$

其中 $h = y - x \tan \alpha$
式中: k 为排水层的渗透系数, m/s ; x 为从上游边界量起的水平距离, m ; y 为衬里以上淋滤液饱和深度(竖直量测), m ; h 为地下水位标高(从上游边界隔离层标高处量起), m 。

再确定下边界饱和深度 y_L 就完成了对该问题的描述。

根据无量纲变量 $X = x/L$, $R = r/(k \sin^2 \alpha)$, $Y = y/(L \tan \alpha)$ 及 $Y_L = y_L/(L \tan \alpha)$ 所表示的统一公式和边界条件的重新引用可以使问题的分析得以简化。式(1)的无量纲形式如下:

$$Y\left(\frac{dY}{dX} - 1\right) + RX = 0 \tag{2}$$

令 $u = Y/X$, 方程(2)通过积分求得解析解如下:

当 $R > 1/4$ 时

$$X = \frac{R - Y_L + Y_L^2}{R - u - u^2} \exp\left[\frac{(1 - A - 2u)(1 + A - 2Y_L)}{(1 + A - 2u)(1 - 2A - 2Y_L)}\right]^{1/(2A)} \tag{3}$$

当 $R = 1/4$ 时

$$X = \frac{1 - 2Y_L}{1 - 2u} \exp\left[\frac{\chi Y_L - u}{(1 - 2Y_L)(1 - 2u)}\right] \tag{4}$$

当 $R < 1/4$ 时

$$X = \left(\frac{R - Y_L + Y_L^2}{R - u - u^2}\right) \exp\left[\frac{1}{B} \tan^{-1}\left(\frac{2Y_L - 1}{B}\right) - \frac{1}{B} \tan^{-1}\left(\frac{2u - 1}{B}\right)\right] \tag{5}$$

当排水层处于最大饱和深度时 $\frac{dY}{dX} = 0$, 从式(2)中可得 $Y = RX$, 也即 $u = R$ 。

在自由排水边界条件下,由文献[2]可知 $Y_L = RS$, 将其和 $u = R$ 代入式(3)~(5)可得公式如下:

当 $R > 1/4$ 时

$$Y_{\max} = (R - RS + R^2 S^2)^{1/2} \cdot \left[\frac{(1 - A - 2R)(1 + R - 2RS)}{(1 + A - 2R)(1 - A - 2RS)}\right]^{1/(2A)} \tag{6}$$

当 $R = 1/4$ 时

$$Y_{\max} = \frac{R(1 - 2RS)}{1 - 2R} \exp\left[\frac{2R(S - 1)}{(1 - 2RS)(1 - 2R)}\right] \tag{7}$$

当 $R < 1/4$ 时

$$Y_{\max} = (R - RS + R^2 S^2)^{1/2} \exp\left[\frac{1}{B} \tan^{-1}\left(\frac{2RS - 1}{B}\right) - \frac{1}{B} \tan^{-1}\left(\frac{2R - 1}{B}\right)\right] \tag{8}$$

2 层状介质的渗滤液饱和深度计算分析

2.1 计算方法

在垃圾填埋场的实际运行中,由于排水系统堵塞或暴雨季节的雨水入渗,渗滤液排水层中的渗滤液饱和深度经常会出现超过排水层厚度的情况,渗滤液经常会在衬里以上的 2 层甚至 3 层介质中流动,如图 2 所示。

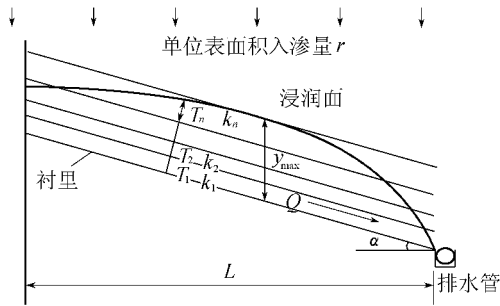


图 2 层状介质中浸润线自由面计算模型

在排水层的渗流运动中,取一个微元段,假定:每层的渗流平行于衬里斜面;各层中水流为一维流动,且各层之间不发生渗流影响;排水层厚度分别为 $T_1, T_2, \dots, T_n$, 排水层渗透系数分别为 $k_1, k_2, \dots, k_n$ 。若通过各层的单宽流量为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, 则通

过整个土层的总渗流量 Q 应为各层排水介质渗流量之和,即

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n k_i i T_i \quad (9)$$

根据达西定律,总渗流量又可以表示为

$$Q = k_i i H = k_i \sum_{i=1}^n T_i \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (11)$$

在层状介质中等效渗透系数为

$$k_{eq} = k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (12)$$

在垃圾填埋场中,衬里上面一般是3层介质:排水层、土工织物层和垃圾层。由于土工织物层的厚度很薄,在分析排水的影响时可以忽略,所以只考虑对排水有贡献的2层介质:排水层和垃圾层。这2层渗透介质的等效渗透系数可以表示为

$$k_{eq} = \frac{k_1 T_1 + k_2 T_2}{T_1 + T_2} \quad (13)$$

由于垃圾层的饱和深度 T_2 未知,所以需要用试算法计算。具体计算方法如下:①只考虑第1层 T_1 为排水层,用式(6)~(8)以及 $Y = y/(L \tan \alpha)$ 计算衬垫上的最大水头。②如果 $(y_{max})_{calculated} \leq T_1 / \cos \alpha$,则计算完成;如果 $(y_{max})_{calculated} > T_1 / \cos \alpha$,则意味着饱和层的饱和深度超过了排水层的饱和深度,必须按双层排水介质计算淋滤液最大饱和深度。③假定一个 T_2 值。④根据假定的 T_2 值和式(13)计算 k_{eq} 。⑤根据假定的 T_2 值计算淋滤液最大饱和深度 $(y_{max})_{assumed} = (T_1 + T_2) / \cos \alpha$ 。⑥使用 k_{eq} 计算淋滤液的最大饱和深度 $(y_{max})_{calculated}$ 。⑦比较计算的最大淋滤液饱和深度和假定的最大淋滤液饱和深度。⑧如果 $(y_{max})_{assumed} \neq (y_{max})_{calculated}$,再假定另一个 T_2 值,重复步骤③~⑦,直到 $(y_{max})_{assumed} = (y_{max})_{calculated}$ 。

对于排水介质超过2层的情况,也可以用类似的方法计算。

2.2 算例

某垃圾填埋场渗滤液导流系统的砂砾排水层厚度 $T_1 = 30$ cm,渗透系数 $k_1 = 0.01$ cm/s,垃圾层渗透系数 $k_2 = 0.001$ cm/s,填埋场底部衬里坡度为20%,2根淋滤液收集管之间的距离为100 m,单位表面积入流量 $r = 1.5$ cm/d,需求底部衬里上的渗滤液最大

饱和深度。

从已知条件可知 $L = 50$ m, $S = \tan \alpha = 0.20$, $\alpha = 11.3^\circ$ 。在只考虑单层排水情况时可计算得 $x = 44.8$ m, $y_{max} = 0.40$ m;通过本文方法可计算得 $x = 40.9$ m, $y_{max} = 0.94$ m;通过文献[6]方法可计算得 $x = 44.5$ m, $y_{max} = 0.44$ m。通过比较可以看出文献[6]的计算方法过低估算了层状渗滤液的最大饱和深度,在计算中偏于安全。对于文献[6]计算方法的不足,柯瀚等[8]有比较详细的论述,并提出了基于线性平均的等效系数的计算方法,但是其方法只局限于标准 Dupuit 假定,不适合衬里坡度大于 6° 的情况,对于本文的算例就难以准确进行计算。比较而言,本文基于扩展 Dupuit 假定所提出的计算方法更为全面和精确。

2.3 参数分析

从上面的基本解析解可以看出,渗滤液最大饱和深度只是 R 和 S 的函数。当渗滤液只在排水层中流动时,其最大饱和深度只是入流量和衬里坡度的函数。由于上面的解是在稳态渗流的假定下推导出来的,入流量只是被假定为长期的平均入渗量,最大饱和深度仅仅被考虑为长期的平均值。从短期效应来看,随着入流量的不断变化,最大饱和深度也会和长期平均最大饱和深度有很大不同。当渗滤液在多层介质中流动时,由于排水层的渗透系数不是常量,渗滤液的最大饱和深度就会呈现比较复杂的情况,但是在计算中只需要考虑 R 的变化对最大饱和深度的影响。图3表明 R 和 S 变化对渗滤液最大饱和深度的影响。从图3中可以看出,随着 R 的增大, y_{max} 成明显增加的趋势;当衬里坡度 S 增大时, y_{max} 增加趋小。

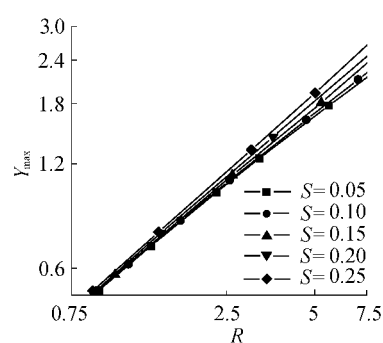


图3 不同衬里坡度下 y_{max} 随 R 的变化

在实际工程中,不但要知道渗滤液最大饱和深度的数值,还需要知道淋滤液饱和深度的位置,在实际填埋场运行和维护过程中通常需要监测渗滤液的最大饱和深度。在这种情况下,就需要对设置监测点的具体地址提出要求。在计算中仅需要知道最大饱和深度出现的位置。图4给出了渗滤液最大饱和

深度随 X 值变化的规律。由图 4 可见,随着 $Y_{\max}$ 的增大, X 呈现逐渐减小的趋势,最大饱和深度出现的位置随着衬里坡度 S 的增加而趋向于下游排水处。

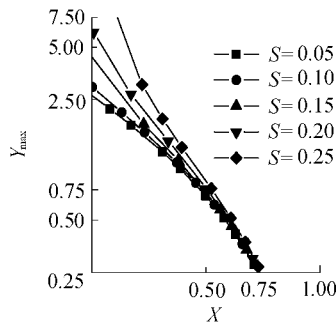


图 4 不同衬里坡度下 $Y_{\max}$ 随 X 的变化

3 结 语

a. 对于坡度较大、不适合使用标准 Dupuit 假定的场合,笔者从达西定律出发提出改进的计算层状介质中渗滤液最大饱和深度的方法,并给出了算例。该方法计算简单、实用,在 excel 中就可以进行计算,一般 2~4 次试算即可达到收敛,在工程设计中具有一定的应用价值。

b. 从工程设计中需要考虑的参数出发,分析了在渗滤液饱和和深度计算中参数 R 和 S 对最大饱和和深度的影响。对于特定的填埋场,由于其他设计参数已知,在最大饱和深度不超出排水层厚度时,单位表面积入渗量 r 是饱和深度计算的主要参数,渗滤液在衬里之上的多层介质中流动时,单位表面积入渗量 r 和等效渗透系数 k_{eq} 是渗滤液最大饱和深度计算的主要参数。

c. 对于实际监测中的具体问题,给出了渗滤液最大饱和深度和其在衬里上出现位置的关系,便于监测人员在实际中操作。文中同时进一步明确了衬里坡角对最大饱和深度出现位置变化的影响。

参考文献:

- [1] EPA/536/SW—869—C, Landfill and surface impoundment performance evaluation[S].
- [2] EPA/SW—869, Landfill and surface impoundments evaluation [S].
- [3] McENROE B M. Steady drainage of landfill covers and bottom liners[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1989, 115(6):1114-1122.
- [4] GIROUD J P, GROSS B A, DARASSE J. Flow in leachate collection layers, steady-state [M]. Livermore: Geosyntec Consultants Republication, 1992.
- [5] McENROE B M. Maximum saturated depth over landfill liners [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1993, 119(2):262-270.
- [6] QIAN Xue-de, GRAY D H, KOERNER R M. Estimation of maximum liquid head over landfill barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, 130(5):488-497.
- [7] QIAN Xue-de. Limit equilibrium analysis of translational failure of landfills under different leachate buildup conditions[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(1):44-62.
- [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.

(收稿日期:2007-10-23 编辑:高建群)

(上接第 19 页)

- [7] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation: ground treatment by deep compaction [M]. London: Telford Ltd, 1976.
- [8] ROLLINS K M, KIM J H. U. S. experience with dynamic compaction of collapsible soils [C]//In-Situ Deep Soil Improvement. New York: ASCE, 1994: 26-43.
- [9] 水伟厚, 高广运, 王亚凌, 等. 湿陷性黄土在强夯作用下的非完全弹性碰撞与冲击应力解析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):92-97.
- [10] 王亚凌, 吴延伟, 水伟厚, 等. 高能级强夯工程实践与推广应用[J]. 地基处理, 2003, 14(3):29-37.
- [11] 陈道立. 强夯加固人工回填火山灰地基的应用效果分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(7):84-85.
- [12] 宋修广, 卢盛松, 李维寅. 强夯加固的动态有限元分析

研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(3):22-25.

- [13] 帅方生. 边界元法在强夯法中的应用[D]. 南京:华东水利学院, 1985.
- [14] 张峰. 碎石土的强夯模型试验研究[J]. 建筑科学, 1992(3):25-28.
- [15] 张平仓, 汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学, 2000, 21(1):76-80.
- [16] 孔令伟, 袁建新. 强夯后地基土变形模量与承载力的反演计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2):153-157.
- [17] 孔令伟. 强夯机制与加固效应研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 1997.
- [18] 水伟厚, 何立军, 詹金林. 高能级强夯加固机理工法研究与专用机械研制[R]. 上海:上海现代建筑设计集团, 2007.

(收稿日期:2008-03-14 编辑:骆超)