

DOI: 10.11779/CJGE201702021

考虑任意初始条件的均质土质覆盖层降雨入渗解析解

邱清文¹, 詹良通¹, 黄依艺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. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 均质土质覆盖层作为填埋场与大气环境的隔离结构其主要功能是控制雨水入渗, 近些年该类覆盖层在北美一些干旱和半干旱地区被证明是有效的。基于二维非饱和土渗流控制方程, 采用可考虑土体进气值的指数函数描述土体的土水特征曲线和渗透系数曲线, 使用单位梯度边界作为土质覆盖层的底部边界条件, 推导出可考虑任意初始条件的降雨入渗移解析解。通过与前人试验结果比较与分析, 证明了该解析解的有效性。对比分析了均质土质覆盖层底部分别取单位梯度边界、渗流审查边界和固定孔压边界对降雨入渗及渗漏量的影响, 分析结果表明: 与渗流审查边界和固定孔压边界相比, 单位梯度边界更适合土质覆盖层的渗漏量计算。利用该解析解分析不同初始条件对累计渗漏量的影响, 结果表明覆盖层累计渗漏量随其底部初始体积含水率的增加而增大。为土质覆盖层防渗漏性能评价提供了一种简单实用的计算方法。

关键词: 均质土质覆盖层; 单位梯度边界; 任意初始条件; 降雨入渗; 解析解

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0359-07

作者简介: 邱清文(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学与环境岩土工程研究方面的工作。E-mail: qiuqingwen105@163.com。

Analytical solutions for rainfall infiltration into monolithic covers considering arbitrary initial conditions

QIU Qing-wen¹, ZHAN Liang-tong¹, HUAGN Yi-yi²

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As an isolation barrier between landfill and atmospheric environment, monolithic covers are used to control rain water infiltration and deep percolation into landfill. In recent years, the covers are proved to be effective in some arid and semi-arid areas in North America. An analytical solution for rain water infiltration into a monolithic cover is presented on the basis of the two-dimensional governing equation for unsaturated flows. The analytical solution can take arbitrary initial conditions into consideration. To obtain the analytical solution, it is assumed that both the soil-water characteristic curve and the permeability function can be described by using the exponential functions considering entry air value and the bottom boundary of the monolithic cover is set as the unit gradient boundary. The analytical results are compared with those measured results reported in literatures, indicating that the analytical solution is effective. The influence on rain water infiltration into a monolithic cover and its percolation of using three boundaries including unit gradient boundary, seepage face boundary and fixed pore water pressure boundary as its bottom boundary are analyzed. The results indicate that compared with the other two boundaries, the unit gradient boundary is more suitable for the monolithic covers to calculate the percolation. The influence of various initial conditions on accumulated percolation of monolithic covers is analyzed using the analytical solution. The research indicates that the accumulated percolation increases with the increase of the initial volumetric water content near the bottom of the covers. This study provides a simple and practical method for evaluating the performance of monolithic covers to control rain water percolation through a soil cover.

Key words: monolithic cover; unit gradient boundary; arbitrary initial condition; rainwater infiltration; analytical solution

0 引 言

封场覆盖层作为填埋场与大气环境的隔离结构其主要功能是减少降雨入渗到填埋场内部形成渗滤液。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB719805)

收稿日期: 2015-11-13

均质土质覆盖层 (monolithic cover) 是由一层适合植物生长的细粒土组成, 此土层通过降雨时存储水分随后植被蒸腾和地表蒸发释放水分的原理控制雨水入渗^[1-2]。相比较传统覆盖层 (如压实黏土覆盖层、土工复合覆盖层等), 土质覆盖层具有构造简单、建造和后期维护费用低以及服役寿命长等优点^[3]。刘川顺等^[4]、McGuire 等^[5]和 Albright 等^[6]通过模型试验和现场试验研究了土质覆盖层的防渗性能。研究结果证明, 土质覆盖层在北美一些干旱和半干旱地区是有效的^[5-6]。詹良通等^[7]、张文杰等^[8]、Benson 等^[9]和 Bohnhoff 等^[10]通过数值模拟对土质覆盖层的防渗性能进行了评价。从现有的报道可知, 针对土质覆盖层的研究主要采用试验和数值两种手段, 采用解析解的研究则很少见诸报道。解析解的方法需要做一些假设从而获得精确解, 当这些假设是合理的, 解析解可作为研究土质覆盖层的简单而又实用的手段。近些年针对与土质覆盖层结构类似的浅层边坡降雨入渗解析解的研究比较多, 例如, Srivastava 等^[11]推导出单层和双层土的一维降雨入渗解析解。基于此解, Zhan 等^[12]和李宁等^[13]分别推导出可考虑坡度和降雨强度的降雨入渗解析解。Huang 等^[14]推导出可考虑水平和垂直方向的一维雨水入渗解析解。Wu 等^[15-16]推导出单层土和双层土的一维降雨入渗与固结变形耦合解析解。然而在初始条件处理方面, 上述解析解或假定存在一个前期降雨并根据底部边界条件进行稳态计算得到一个含水率分布作为初始条件^[11-13], 或假定初始含水率分布为线性或特定函数^[14-16], 而根据实际情况, 初始含水率分布往往与这些假定有所不同。更为关键的是, 以上这些降雨入渗解析解采用的底部边界条件均为固定孔压边界, 而该边界条件不适合厚度较薄 (1~2 m)、降雨入渗对其底部孔压有影响的土质覆盖层。在土质覆盖层中, 随着雨水下渗到覆盖层底部, 其土体含水率逐渐增加并超过田间持水量时发生渗漏, 因此土质覆盖层底部使用流量边界更适合。前人采用数值模拟对土质覆盖层进行研究时底部边界往往使用单位梯度边界和渗流审查边界^[7-10]。单位梯度边界表示底部土体孔压梯度为 0, 即只允许底部在重力作用下产生渗漏, 渗漏速率为底部土体含水率对应的非饱和渗透系数; 渗流审查边界则要求覆盖层底部未达到饱和之前, 水分不能透过底部形成渗漏量, 即覆盖层相当于一个容器持续储存水分, 仅当底部达到饱和后, 才开始渗漏, 渗漏速率为土体的饱和渗透系数。相比较渗流审查边界, 单位梯度边界计算的渗漏量更偏保守, 因此被广泛地使用^[9-10]。

本文基于二维非饱和土渗流控制方程, 采用可考虑土体进气值的指数函数描述土体的土水特征曲线和渗透系数曲线, 使用单位梯度边界作为土质覆盖层底

部边界条件推导出可考虑任意初始条件的降雨入渗解析解。采用前人的试验结果对该解析解进行了验证。对比分析了土质覆盖层底部分别取单位梯度边界、渗流审查边界和固定孔压边界对降雨入渗及渗漏量的影响, 并与试验结果进行比较。最后基于本文的解析解, 分析了不同初始条件对覆盖层渗漏量的影响。

1 均质土质覆盖层降雨入渗模型

1.1 模型假定

图 1 为二维坐标下倾斜土质覆盖层的示意图。为求得降雨入渗条件下, 土质覆盖层内水分运移的精确解, 本文作了如下 5 个基本假定。

(1) 假定土质覆盖层的土层是均质的, 且在干湿循环过程中孔隙率不随时间变化。

(2) 假定土质覆盖层的斜坡长度为无限长, 由于土质覆盖层的厚度通常显著小于其斜坡长度, 该假定是适用的。

(3) 假定土质覆盖层的孔隙水压力等值线平行于斜坡面, 该假定已被 Zhan 等^[12]证明。

(4) 假定土体中孔隙气压力与大气连通, 且不影响土体中水分的运移。

(5) 假定土体中的温度及其变化不影响土体中水分的运移。

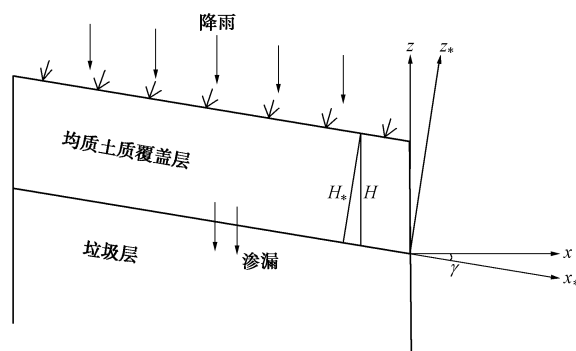


图 1 倾斜均质土质覆盖层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an inclined monolithic cover

1.2 控制方程推导

Zhan 等^[12]通过假定孔隙水压力等值线平行于斜坡面将二维非饱和土渗流问题简化为一维问题, 并得到其控制方程如式 (1) 所示。本文倾斜均质土质覆盖层渗流控制方程采用此公式。

$$\frac{\partial}{\partial z_*} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z_*} + k \cos \gamma \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中, k 为土体的非饱和渗透系数, θ 为土体的体积含水率, ψ 为孔隙水压力水头, γ 为覆盖层坡度, t 为时间, z_* 为竖向坐标。

可以看出, 式 (1) 中除了左侧第二项乘了 $\cos \gamma$

以外, 与一维非饱和土渗流控制方程 Richards 方程非常相似。非饱和渗透系数 k 可以是孔隙水压力水头的函数, 它的高度非线性给式 (1) 的求解造成了困难。基于前人的研究, 本文采用可考虑土体进气值的指数函数, 如式 (2)、(3) 来描述非饱和土的土水特征曲线和渗透系数曲线^[16]:

$$k = \begin{cases} k_s e^{\alpha(\psi + \psi_{ac})} & (\psi \leq -\psi_{ac}) \\ k_s & (\psi > -\psi_{ac}) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\alpha(\psi + \psi_{ac})} & (\psi \leq -\psi_{ac}) \\ \theta_s & (\psi > -\psi_{ac}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, k_s 为饱和渗透系数, α 为减饱和系数, θ_s 为饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, ψ_{ac} 为土体进气值。

通过将式 (2)、(3) 带入式 (1), 可将式 (1) 变成

$$\frac{\partial^2 k}{\partial z_*^2} + \alpha \cos \gamma \frac{\partial k}{\partial z_*} = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{k_s} \frac{\partial k}{\partial t} \quad (4)$$

1.3 边界条件和初始条件的确定

由于土质覆盖层的斜坡长度可视为无限长, 因此仅考虑垂直于斜坡面的渗流, 斜坡表面单位长度上所承接的雨量为实际降雨的 $\cos \gamma$ 倍, 因此覆盖层上边界条件为^[12]

$$\left(k \cos \gamma + k \frac{\partial \psi}{\partial z_*} \right) \Big|_{z_* = H_*} = q \cos \gamma, \quad (5)$$

式中, H_* 为覆盖层的厚度, 如图 1 所示, q 为降雨强度。

将式 (2) 代入式 (5), 可使得式 (5) 转换为

$$\left(k \cos \gamma + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial k}{\partial z_*} \right) \Big|_{z_* = H_*} = q \cos \gamma \quad (6)$$

本文土质覆盖层底部采用单位梯度边界^[9-10], 将式 (2) 代入, 可得到其表达式为

$$\frac{\partial \psi}{\partial z_*} \Big|_{z_* = 0} = 0 \Rightarrow \frac{1}{\alpha} \frac{\partial k}{\partial z_*} \Big|_{z_* = 0} = 0 \quad (7)$$

初始条件可根据覆盖层的实际含水率分布, 用二次函数对其进行拟合, 拟合表达式为

$$\theta_0 = Az_*^2 + Bz_* + C, \quad (8)$$

式中, θ_0 为初始体积含水率, A, B, C 为拟合参数 (考虑实际需要, 本文 A 可为 0)。

联合式 (2)、(3), 可将式 (8) 转换为初始非饱和和渗透系数分布, 如下式所示, 并将其作为本文解析解的初始条件

$$k_0 = \frac{(Az_*^2 + Bz_* + C) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} k_s \quad (9)$$

1.4 解析解的求解

为简化各公式定义了如下的无量纲参数:

$$\left. \begin{aligned} k' &= k / k_s, \\ q' &= q / k_s, \\ z' &= \alpha \cos \gamma z_*, \\ H' &= \alpha \cos \gamma H_*, \\ t' &= \frac{\alpha \cos^2 \gamma k_s t}{\theta_s - \theta_r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

把式 (10) 代入式 (4)、(6)、(7)、(9), 可得土质覆盖层的渗流控制方程、边界条件以及初始条件如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 k'}{\partial z'^2} + \frac{\partial k'}{\partial z'} &= \frac{\partial k'}{\partial t'}, \\ \frac{\partial k'}{\partial z'} + k' &= q' \quad (z' = H'), \\ \frac{\partial k'}{\partial z'} &= 0 \quad (z' = 0), \\ k' &= \frac{\left[\frac{Az'^2}{(\alpha \cos \gamma)^2} + \frac{Bz'}{\alpha \cos \gamma} + C \right] - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (t' = 0). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

为方便求解式 (11), 采用如下转换公式:

$$k'(z', t') = W(z', t') e^{\frac{1}{2}z' - \frac{1}{4}t'} \quad (12)$$

使用转换式 (12), 可将式 (11) 转换成下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 W}{\partial z'^2} &= \frac{\partial W}{\partial t'}, \\ \frac{\partial W}{\partial z'} + \frac{1}{2}W &= q' e^{\frac{1}{2}z' + \frac{1}{4}t'} \quad (z' = H'), \\ \frac{\partial W}{\partial z'} - \frac{1}{2}W &= 0 \quad (z' = 0), \\ W &= \frac{\left[\frac{Az'^2}{(\alpha \cos \gamma)^2} + \frac{Bz'}{\alpha \cos \gamma} + C \right] - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} e^{\frac{1}{2}z'} \quad (t' = 0). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

通过傅里叶积分^[17]可得到式 (13) 的解如下所示:

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2[\beta_m \cos(\beta_m z') + 0.5 \sin(\beta_m z')]}{[H'(\beta_m^2 + 0.25) + 1](0.25 + \beta_m^2)} \times \left[(0.25 + \beta_m^2) e^{-\beta_m^2 t'} F(\beta_m) + q' e^{\frac{1}{2}H'} \right. \\ \left. [\beta_m \cos(\beta_m H') + 0.5 \sin(\beta_m H')] \times [e^{\frac{1}{4}t'} - e^{-\beta_m^2 t'}] \right] \quad (14)$$

式 (14) 中特征值 β_m 为式 (15) 超越方程的正根, 本文采用 Matlab 编程对该超越方程进行求解。

$$\tan(\beta_m H') = \frac{\beta_m}{\beta_m^2 - 0.25} \quad (15)$$

式 (14) 中 $F(\beta_m)$ 如下表示:

$$F(\beta_m) = \frac{(C - \theta_r) \sin(\beta_m H') e^{\frac{1}{2} H'}}{\theta_s - \theta_r} + \frac{B \left[\sin(\beta_m H') H' e^{\frac{1}{2} H'} - D(\beta_m) \right]}{\alpha \cos \gamma (\theta_s - \theta_r)} + \frac{A \left[\sin(\beta_m H') H'^2 e^{\frac{1}{2} H'} - 2E(\beta_m) \right]}{(\alpha \cos \gamma)^2 (\theta_s - \theta_r)}, \quad (16)$$

$$\text{其中, } D(\beta_m) = \frac{4\beta_m + (3 - 4\beta_m^2) e^{\frac{1}{2} H'} \sin(\beta_m H')}{1 + 4\beta_m^2},$$

$$E(\beta_m) = \frac{16\beta_m \left[2\cos(\beta_m H') e^{\frac{1}{2} H'} - 1 \right] + (3 - 4\beta_m^2) e^{\frac{1}{2} H'} H' \sin(\beta_m H')}{1 + 4\beta_m^2}.$$

将式(14)代入式(12)可得

$$k'(z', t') = \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2[\beta_m \cos(\beta_m z') + 0.5 \sin(\beta_m z')]}{[H'(\beta_m^2 + 0.25) + 1](0.25 + \beta_m^2)} \cdot \left[(0.25 + \beta_m^2) e^{-\beta_m^2 t'} F(\beta_m) + q' e^{\frac{1}{2} H'} [\beta_m \cos(\beta_m H') + 0.5 \sin(\beta_m H')] \cdot \left[e^{\frac{1}{4} t'} - e^{-\beta_m^2 t'} \right] \right] \right\} \times e^{\frac{1}{2} z' - \frac{1}{4} t'}. \quad (17)$$

使用式(2)、(10)、(17), 可求得孔隙水压力水头如下所示:

$$\psi = \frac{\ln k'}{\alpha} - \psi_{ac}. \quad (18)$$

均质土质覆盖层的底部渗漏速率用下式表示:

$$P_{er} = k k_s \cos \gamma. \quad (19)$$

2 解析解试验验证

下文采用前人的试验结果对上文的解析解进行验证。刘川顺等^[4]在武汉大学开展了6组室外均质土质覆盖层一维模型试验, 并对自然条件下覆盖层的水量平衡进行了长期监测。该6组试验除了植被条件, 其他条件一致。试验模型槽的长、宽和高分别为3.6, 1.3, 1.3 m。模型槽底部铺设厚度为0.6 m的垃圾层, 垃圾层以上铺设厚度为0.6 m的均质土质覆盖层, 覆盖层所用土料为当地壤土。覆盖层地表低于模型槽的围壁高度, 因此降雨不产生地表径流, 即使降雨强度高于土体的入渗强度, 表层积累的水分也会在雨后逐渐入渗到土体中。在覆盖层0.2, 0.4, 0.6 m 3个深度均埋设了TDR探头, 用于测试3个深度的含水率。在覆盖层和垃圾层的交界面设置了3组漏斗状渗漏量收集装置, 用于测试覆盖层的渗漏量。

试验用土的饱和体积含水率和饱和渗透系数分别为0.44, 8.06×10^{-6} m/s。使用式(2)、(3)对该土样

的土水特征曲线和渗透系数曲线进行拟合, 结果如图2, 3所示, 拟合参数如图2, 3和表1所示。根据表1中的数据求得该试验工况对应的 β_m 值。由式(17)、(16)可知, 随着 β_m 值逐渐增大, 式(17) k' 受 β_m 值的影响逐渐减小, 因此本文在计算 k' 时只考虑了前1000个 β_m 值。

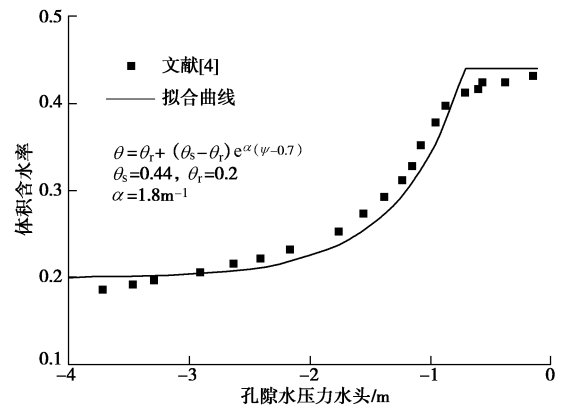


图2 土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curves

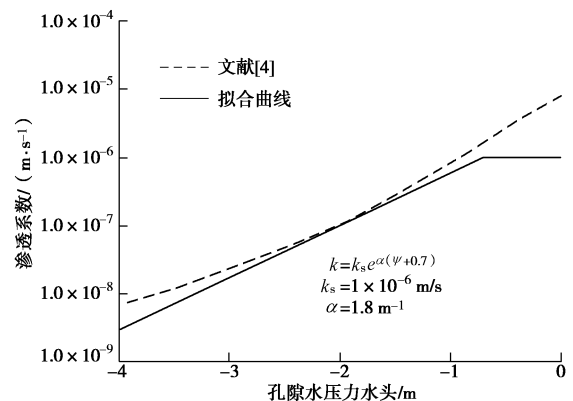


图3 渗透系数曲线

Fig. 3 Hydraulic conductivity characteristic curves

文献[4]报道了2007年5月16日—2007年12月10日这期间模型试验的测试结果, 其中第5组试验的覆盖层在5月30日发生了强降雨引发渗漏事件, 降雨前覆盖层的初始储水量为121 mm, 当天降雨量为118 mm, 蒸发蒸腾量为3 mm, 渗漏量为19 mm, 降雨结束后储水量增加至217 mm。由于蒸发蒸腾量仅为降雨量的2.5%, 且局限于浅部土层, 对底部渗漏量影响较小, 因此可假定蒸发蒸腾对降雨入渗没有影响, 从而可将复杂的地表水文过程近似地处理为简单的降雨入渗过程, 并用于验证本文推导的解析解。验证采用的降雨量为实际降雨量与蒸发蒸腾量之差值115 mm, 并将其均匀分配至24 h^[10, 18], 可得到降雨入渗强度为 1.33×10^{-6} m/s。由于报道中缺乏当天体积含水率剖面随时间变化的结果, 本文将初始储水量均匀化处理, 可得到覆盖层平均初始体积含水率为0.202, 即A和B

表 1 计算使用的参数
Table 1 Parameters used in section

饱和体积 含水率 θ_s	残余体积 含水率 θ_r	减饱和系 数 $\alpha/(\text{m}^{-1})$	进气值 ψ_{ae}/m	饱和渗透系 数 $k_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	初始平均体 积含水率 θ_0	降雨入渗 强度 $q/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	降雨 历时/h	覆盖层 厚度/m	坡度 γ
0.44	0.2	1.8	0.7	1×10^{-6}	0.202	1.33×10^{-6}	24	0.6	0

均为 0, C 为 0.202。使用式 (9) 将初始体积含水率转化为初始非饱和渗透系数为 $8.3\times 10^{-9}\text{ m/s}$ 。

上文这些参数汇总在表 1 中。将表 1 的参数代入上文解析解进行计算, 可得到覆盖层体积含水率剖面随时间的变化如图 4 中的实线所示。从图 4 可知, 随着雨水持续入渗, 覆盖层各深度体积含水率逐渐增加, 在 4~8 h 期间, 雨水达到覆盖层底部。将图 4 中不同深度体积含水率与其对应的土体厚度相乘可得到储水量, 其随时间变化如图 5 的实线所示, 并与实测数据进行了比较。从图 5 可知, 计算得到的储水量从 121 mm 增加至 215 mm, 与实测值 217 mm 接近。计算得到累计渗漏量随时间的变化如图 6 的实线所示, 并与实测数据进行了比较。从图 6 可知, 解析解计算得到的累计渗漏量为 21 mm, 与实测值 19 mm 接近。从图 6 还可知, 降雨入渗 6 h 后, 渗漏开始发生, 并逐渐增加。

为分析不同底部边界条件对覆盖层水分运移和渗漏量的影响, 使用商业软件 Geostudio 的 Seep/w 模块对该降雨引发渗漏事件进行模拟分析。覆盖层模型底部分别取渗流审查边界和固定孔压边界, 其他条件与上文解析解一样, 计算得到该两种底部边界条件对应的体积含水率剖面如图 4 中其他两种虚线所示, 储水量和累计渗漏量随时间的变化则分别如图 5, 6 的其他两种虚线所示。

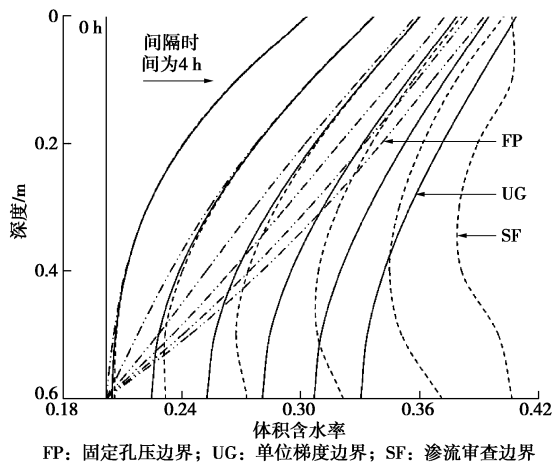


图 4 不同底部边界条件的体积含水率剖面随时间的变化
Fig. 4 Changes of volumetric water content profiles with time for three different bottom boundaries

从图 4 可知, 在 0~4 h, 3 种不同底部边界条件对应的体积含水率剖面几乎一致; 在 4~24 h, 随着雨水下渗到覆盖层底部, 不同底部边界条件对覆盖层内

水分运移的影响逐渐显著。其中, 渗流审查边界对应的覆盖层各深度体积含水率增加速度最快, 其次分别是单位梯度边界和固定孔压边界。造成这个结果的原因在下文描述图 5, 6 中介绍。图 4 结果还表明, 越远离底部边界的土体, 其对应的体积含水率受底部边界条件的影响越小。

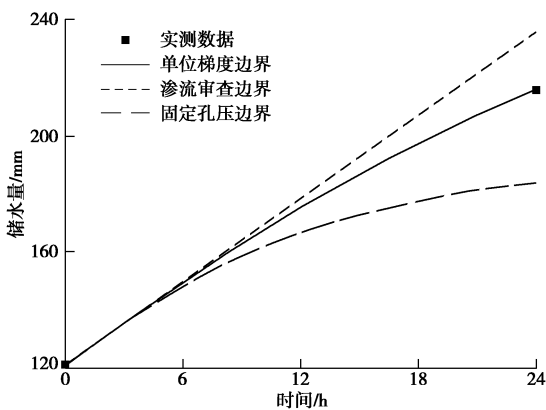


图 5 不同底部边界条件的水分储存量与实测结果的比较
Fig. 5 Comparison between calculated water storages for three different bottom boundaries and measured results

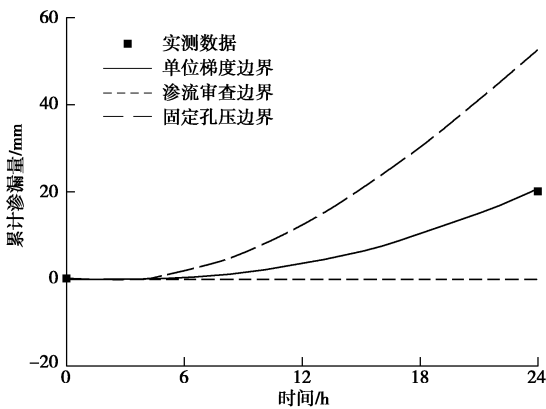


图 6 不同底部边界条件的累计渗漏量与实测结果的比较
Fig. 6 Comparison between calculated accumulated percolations for three different bottom boundaries and measured results

从图 5, 6 可知, 在前 4 h, 由于雨水未下渗到覆盖层底部, 使得 3 个边界条件对应的渗漏量均为 0; 在 4~24 h, 由于渗流审查边界只允许覆盖层底部达到饱和后才开始渗漏, 而该边界条件对应的覆盖层底部在降雨期间未达到饱和 (见图 4), 因此其无渗漏发生, 从而导致该边界条件对应的覆盖层储水量最大, 各深度体积含水率增加速度最快; 固定孔压边界要求覆盖

层底部孔压是恒定的，即底部含水率不变（见图 4），导致入渗到覆盖层底部土体的雨水全部透过覆盖层形成渗漏量，因此其对应的渗漏量最大，储水量最小，各深度体积含水率增加最慢。从图 5，6 的结果可知，相比较渗流审查边界和固定孔压边界，单位梯度边界更适合土质覆盖层的降雨入渗和渗漏量计算。

3 不同初始条件对渗漏量的影响

为分析不同初始条件（初始体积含水率分布）对渗漏量的影响，本文分别计算了均匀型、线性型和非线性型 3 种初始体积含水率分布模式对应的累计渗漏量并加以比较分析。3 种初始体积含水率分布模式见图 7。如图 7 所示，均匀型、线性型和非线性型 3 种初始体积含水率分布模式不同，但其对应的平均含水率均为 0.25，其中线性型对应的底部体积含水率最大，其后分别是非线性型和均匀型，而上部体积含水率则恰好相反。分析使用的土体水力特性参数（包括饱和体积含水率、残余体积含水率、减饱和系数、进气值和饱和渗透系数）见表 1，其他参数，包括降雨强度、降雨历时、覆盖层厚度和坡度分别设为 1×10^{-6} m/s，24 h、1 m 和 18.4° （即坡比为 1:3）。采用上文解析解计算得到该 3 种初始体积含水分布模式对应的累计渗漏量见图 8。如图 8 所示，线性型对应的累计渗漏量最大，其次分别是非线性型和均匀型，这是因为线性型对应的覆盖层底部初始体积含水率最大，即渗透系数最大，导致其累计渗漏量最大，这三者对应的累计渗漏量分别为 22.8 mm，21 mm 和 19.2 mm。由此可知，覆盖层累计渗漏量随其底部初始体积含水率的增加而增大。图 8 显示 3 种初始条件对应的累计渗漏量在 0 h 时刻为非零值，这是因为该 3 种初始条件对应的底部体积含水率均超过该类土的田间持水量 0.2（孔压为 -33 kPa 对应的体积含水率，见图 2），使得在 0 h 时刻就已经有渗漏发生。

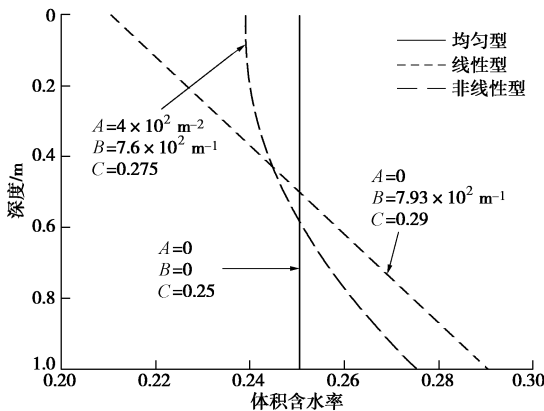


图 7 不同初始体积含水率分布模式

Fig. 7 Distribution patterns of three different initial volumetric water contents

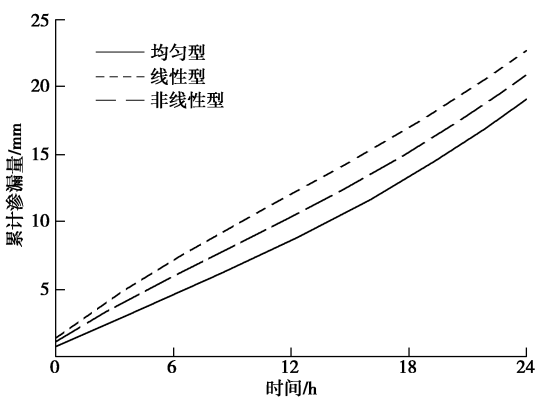


图 8 不同初始体积含水率分布对应的累计渗漏量

Fig. 8 Accumulated percolations for distributions of three different initial volumetric water contents

4 结 语

本文基于二维非饱和土渗流控制方程，采用可考虑土体进气值的指数函数描述土体的土水特征曲线和渗透系数曲线，采用单位梯度边界作为土质覆盖层底部边界条件推导出可考虑任意初始条件的降雨入渗解析解。通过与刘川顺等^[4]的室外模型试验结果进行比较和分析，证明了该解析解是有效的。

对比分析了均质土质覆盖层底部分别取 3 种边界条件对其降雨入渗及渗漏量的影响。分析结果表明单位梯度边界优于渗流审查边界以及固定孔压边界。

使用该解析解计算了均匀型、线性型和非线性型 3 种不同初始体积含水率分布对应的覆盖层累计渗漏量，结果表明渗漏量随其底部初始体积含水率的增加而增加。

本文推导的解析解是一种简单而实用的计算方法，可用于评估土质覆盖层的防渗性能。

参考文献:

[1] ALBRIGHT W H, GEE G W, WILSON G V, et al. Alternative cover assessment project: Phase I report[R]. Publication No. 41183. Reno: Desert Research Institute, 2002.

[2] HAUSER V L, WEAND B L, GILL M D. Natural covers for landfills and buried waste [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(9): 768 - 775.

[3] SCHNABEL W, LEE W, BARNES D L. A numerical simulation of evapotranspiration landfill cover performance at three cold-region locations[C]// World Water and Environmental Resources Congress. Alaska, 2005: 1 - 8.

[4] 刘川顺, 赵 慧, 罗继武. 垃圾填埋场覆盖系统渗沥控制试验和数值模拟[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 289 - 296. (LIU Chuan-shun, ZHAO Hui, LUO Ji-wu. Experiment and

- numerical simulation of percolation control using evapotranspirative landfill cover system[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 289 - 296. (in Chinese))
- [5] MCGUIRE P E, ANDRASKI B J, ARCHIBALD R E. Case study of a full-scale evapotranspiration cover[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(3): 316 - 332.
- [6] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(6): 2317 - 2332.
- [7] 詹良通, 贾官伟, 邓林恒, 等. 湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1812 - 1818. (ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, DENG Lin-heng, et al. Performance of earthen final covers of landfills in humid areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1812 - 1818. (in Chinese))
- [8] 张文杰, 邱战洪, 朱成仁, 等. 长三角地区填埋场 ET 封顶系统的性能评价[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(3): 384 - 389. (ZHANG Wen-jie, QIU Zhan-hong, ZHU Cheng-ren, et al. Evaluation of evapotranspiration covers of landfills in Yangtze River delta region[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(3): 384 - 389. (in Chinese))
- [9] BENSON C H, BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, et al. Field data and model predictions for a monolithic alternative cover[C]// *Geo-Frontiers Congress*. Texas, 2005: 1 - 16.
- [10] BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, BENSON C H, et al. Field Data and Water-Balance predictions for a monolithic cover in a semiarid climate[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(3): 333 - 348.
- [11] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils[J]. *Water Resources Research*, 1991, **27**(5): 753 - 762.
- [12] ZHAN T L T, JIA G W, CHEN Y M, et al. An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, **37**(12): 1737 - 1760.
- [13] 李 宁, 许建聪. 无限长均质斜坡降雨入渗解析解[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2325 - 2330. (LI Ning, XU Jian-cong. Analytical solutions for rainfall infiltration into homogenous infinite slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2325 - 2330. (in Chinese))
- [14] HUANG R Q, WU L Z. Analytical solutions to 1-D horizontal and vertical water infiltration in saturated/unsaturated soil considering time-varying rainfall [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, **39**: 66 - 72.
- [15] WU L Z, ZHANG L M. Analytical solution to 1D coupled water infiltration and deformation in unsaturated soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, **33**(6): 773 - 790.
- [16] WU L Z, ZHANG L M, HUANG R Q. Analytical solution to 1D coupled water infiltration and deformation in two-layer unsaturated soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, **36**(6): 798 - 816.
- [17] OZISIK M N. *Boundary value problems of heat conduction* [M]. New York: Dover, 2002.
- [18] OGORZALEK A S, BOHNHOFF G L, SHACKELFORD C D, et al. Comparison of field data and water-balance predictions for a capillary barrier cover[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(4): 470 - 486.