

降雨入渗补给下的滑坡潜水面近似解析解浅析*

徐建强¹, 任伟中², 李海平¹, 阎宗岭¹

(1.招商局重庆交通科研设计院有限公司、国家山区公路工程技术研究中心、重庆市山区道路工程与防灾减灾工程中心,重庆 400067; 2.中科院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室,武汉 430071)

摘要:近年来,伴随着极端气候的不断出现,强降雨引发的地质灾害逐渐增多。大气降雨的入渗一方面改变了岩土体的物理力学性质,另一方面,随着降雨的进一步进行和包气带内土中所含水分进一步下渗,大气降雨将补给在相对隔水的滑带处形成的潜水面。论文从渗流基本原理出发,采用稳定渗流情况下的潜水面作为非稳定渗流的初始值,推导出降雨入渗下潜水面的解析解,然后对近似解析解的误差做定量分析,阐述近似解析解在滑坡等地质灾害的潜水位求解过程中的适用性,可用于指导受大气降雨补给潜水面的滑坡浸润线的求解,便于分析大气降雨产生的直接影响。

关键词: 降雨入渗补给; 潜水面; 滑坡; 近似解析解

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2016)增1-0400-04

Brief Analysis on the Approximate Analytic Solution of Landslide Water Table with Recharge from Rainfall Infiltration

Xu Jianqiang¹, Ren Weizhong², Li Haiping¹, Yan Zongling¹

(1. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co. Ltd. & National Engineering & Research Center for Highways in Mountain Area & National Joint Engineering Laboratory of Road Engineering and Disaster Prevention for Mountain Areas, Chongqing 400067, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: Geologic hazards that initiated by extreme record-breaking weather conditions (especially rainfall) keep occurring in recent years. The rainfall infiltration weakened the physical-mechanical properties of rock and soil mass as well as recharged the landslide water table as the rainfall continued. The approximate analytic solution of landslide water table with recharge from rainfall infiltration was analysed with the fundamental of seepage theory and by using steady seepage flow water table solution as the unsteady one's initial value. The quantitative analysis of error and applicability of the approximate analytic solution was described finally. All of these can be used to guide to solve the landslide seepage line and consider the influence of atmospheric precipitation.

Key words: recharge from rainfall infiltration; water table; landslide; approximate analytic solution

* 收稿日期: 2016-04-05(修改稿)

作者简介: 徐建强(1986-)男,硕士,河北唐山人,工程师,主要从事高边坡支挡防护、滑坡治理等方面的设计、咨询和科研工作。E-mail: 357472746@qq.com

基金项目: 国家科技支撑计划课题: 西南山区干线公路路基灾变过程控制与动态调控技术(课题编号: 2015BAK09B01)

1 引言

大部分滑坡的水文地质结构为滑坡体统一含水潜水型, 滑坡体含水、滑带相对隔水及外界因素(降雨、地表水入渗、库水位等)变化关系密切的情况下, 在横向上一般不易形成统一的地下水位, 而在纵向上往往形成统一的地下水浸润曲线, 边界条件清楚, 形成一个完整的水文地质单元。

当滑带面处形成毛细饱和区, 与饱水带一样都被水饱和, 但是毛细饱和区以垂直入渗为主, 水平渗流微弱或没有, 而饱水带则形成了统一的自由水面, 以沿滑面的渗流为主, 而垂直渗流微弱。毛细饱和区的渗透系数随含水量的降低而变小, 而饱水带的渗透系数是个定值。随着降雨的进一步进行和包气带内土中所含水分进一步下渗, 在相对隔水的滑带处将逐渐形成一自由水面, 即潜水面。因此, 强降雨入渗则易导致滑坡复活^[1]。

郑颖人等^[2]根据用 Boussinesq 非稳定渗流基本微分方程和边界条件, 得到了库水位下降情况下浸润线的计算公式, 并用多项式拟合的方法得到了便于工程使用的简化公式; 冯文凯、吴越、张友谊等^[3,9,11]研究了库水位升降联合降雨, 在水平隔水底板边界条件下的浸润线的解析解; 吴琼、唐辉明等^[4]研究了库水位升降联合降雨, 在水平隔水底板缓倾边界条件下的浸润线的解析解并与数值计算的结果进行了对比, 对解析解造成的误差进行了定性分析。但实际中大部分滑坡的隔水底板(即滑面)并非水平且倾角变化幅度较大, 求解非水平滑面的滑坡在降雨入渗情况下的潜水面, 并将误差量化显得非常重要。

本文从渗流基本原理出发, 采用稳定渗流情况下的潜水面作为非稳定渗流的初始值, 推导出降雨入渗下非水平滑面的潜水面的解析解, 然后对近似解析解的误差作定量分析, 阐述近似解析解在潜水位求解过程中的适用性。

2 一维潜水流动的连续性方程

在 Dupuit 假设的前提下, 导出一维潜水流动的连续性方程如下^[5]:

$$-\frac{\partial Q(x)}{\partial x} + w = n_e \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

根据 Dupuit 假设, 可得到单宽流量 $Q(x)$:

$$Q(x) = -kh \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中得到:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial H}{\partial x} \right) + w = n_e \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

式中: n_e 为有效孔隙率, 无量纲; w 为降雨(正值)或蒸发(负值)强度; t 为时间; k 为含水层的渗透系数, 为定值。

该式即为有渗入补给的潜水含水层的非稳定流动的 Boussinesq 方程。

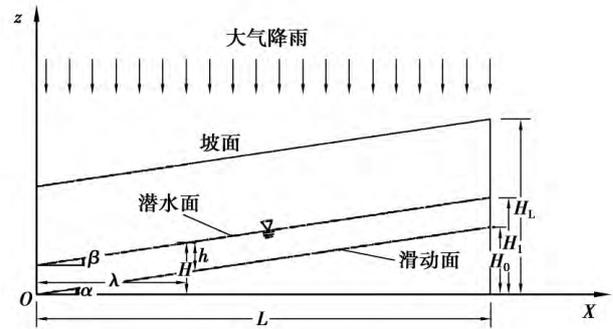


图 1 潜水面计算简图

Fig.1 The sketch map of water table solution

3 降雨作用下浸润线的解析解

由于式(3)为非线性微分方程, 无法得到解析解, 故对其进行线性化处理。将含水层厚度 h 近似地看作常量, 用时段始、末含水层的平均厚度 h_m 代替, 可以得到简化的一维非稳定渗流的运动方程:

$$\frac{kh_m}{n_e} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{w}{n_e} = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

$$H(x, t) = h(x, t) + xt \tan \alpha \quad (5)$$

得到:

$$\frac{kh_m}{n_e} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{w}{n_e} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

设水位变幅函数为 $u(x, t) = h(x, t) - h(x, 0) = h(x, t)$

可以得到

$$\frac{kh_m}{n_e} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{w}{n_e} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7)$$

联立边界条件等可以得到如下微分方程:

$$\begin{cases} \frac{kh_m}{n_e} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{w}{n_e} = \frac{\partial u}{\partial t} \\ u(x, 0) = 0 & (0 < x < \infty) \\ u(0, t) = 0 & (t > 0) \\ u(\infty, t) = \frac{w}{n_e} t & (t > 0) \end{cases}$$

Laplace 变换和逆变换后可得, 潜水面的近似解析解为:

$$H(x, t) = u(x, t) + x \tan \alpha \quad (8)$$

式中: $u(x, t) = \frac{w}{n_e} t(1 - R(\lambda))$; $R(\lambda) = (1 + 2\lambda^2) \operatorname{erfc}(\lambda)$

$$(\lambda) = \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi}} e^{-\lambda^2}; \operatorname{erfc}(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\lambda}^{\infty} e^{-t^2} dt; \lambda = \frac{x}{2\sqrt{\frac{Kh_m}{\mu} t}}$$

4 潜水面近似解析解的误差分析

Dupuit 假设实质是在可以忽略流动的垂直分量的区域内, 假定等势面垂直, 潜水流动基本水平。

由于上述潜水面解析解的求解过程中引入 Dupuit 假设, 造成的误差分析如下:

单宽流量的精确解:

$$Q_x = -K_x \int_0^{H(x)} \left[\frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial x} \right] dz$$

$$= -K_x \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \int_0^{H(x)} \varphi(x, z) dz - \frac{hH^2}{2} \right\} = -K_x \frac{\partial \varphi'}{\partial x}$$

式中: $\varphi' = H\bar{\varphi} - \frac{H^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{H(x)} \varphi(x, z) dz$

分部积分可得:

$$\varphi' = \int_0^{H(x)} \varphi(x, z) dz - \frac{H^2}{2} =$$

$$[z\varphi(x, z)]_0^{H(x)} - \int_0^{H(x)} z \frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial z} dz - \frac{H^2(x)}{2} =$$

$$\frac{H^2(x)}{2} \left[1 + \frac{2}{K_z H^2(x)} \int_0^{H(x)} z Q_z(x, z) dz \right]$$

式中: $Q_z = Q_z(z) = -K_z \frac{\partial \varphi}{\partial z}$; $Q_z(h) < Q_z < 0$

引入 Dupuit 假设后:

$$Q_x = -KH(x) \frac{\partial H}{\partial x} = -K \frac{\partial (H^2/2)}{\partial x}$$

引入 Dupuit 假设后的 Q_x 近似解, 实际是用 $H^2/2$ 代替精确解 Q_x 中的 $\varphi'^{[82]}$ 。在潜水面处 $\varphi = h$ 因此:

$$\frac{d\varphi}{dx} \equiv \frac{dH}{dx} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{z=H} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)_{z=H} \frac{dH}{dx} =$$

$$- \left(\frac{Q_x}{K_x} \right)_{z=H} - \left(\frac{Q_z}{K_z} \right)_{z=H} \frac{dH}{dx}$$

因为 $\frac{Q_z}{Q_x} = \frac{dH}{dx}$

$$Q_z \Big|_{z=H} = - \frac{K_x i^2}{1 + (K_x/K_z) i^2}$$

式中: $i = \frac{dH}{dx}$ 为潜水面坡度。

φ' 中积分项的变化范围为:

$$0 > \int_0^{H(x)} z Q_z(x, z) dz > - \frac{K_x i^2}{1 + (K_x/K_z) i^2} \frac{H^2}{2}$$

所以引入 Dupuit 假设引起的误差为:

$$0 > \frac{H^2/2 - \varphi'}{H^2/2} > \frac{(K_x/K_z) i^2}{1 + (K_x/K_z) i^2}$$

因此只要保证 $(K_x/K_z) i^2 \ll 1$, Dupuit 假设后近似解中 $H^2/2$ 代替精确解中的 φ' 的误差就很小。

本例中由基本假定可知 $K_x = K_z = K$

因此 $0 > \frac{H^2/2 - \varphi'}{H^2/2} = \varepsilon > \frac{i^2}{1 + i^2}$

微小 dx 段, 潜水面近似平行于隔水底板, 故

$$i = \frac{dH}{dx} = \tan \alpha$$

图 2 为 Dupuit 假设引起的误差与隔水底板的关系图, 由图 2 可知, 只要隔水底板倾角不大 18° , 由于引入 Dupuit 假设而造成的潜水面解析解与精确解的误差在 10% 以内。

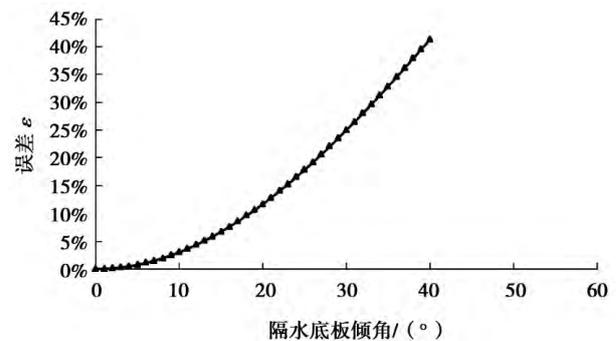


图 2 误差分析图

Fig.2 Error analysis

5 适用性分析

郑颖人等^[2] 根据用 Boussinesq^[8] 非稳定渗流基本微分方程和边界条件, 得到了库水位下降情况下浸润线的计算公式, 假定条件过于苛刻, 限制了其在实际工程中的应用。

吴琼、唐辉明等^[4] 研究了库水位升降联合降雨解析解, 且与数值计算的结果较为接近, 但其限制了隔水底板需要 $< 7^\circ$ 的边界条件下, 同样限制了其在实际工程中的应用。

本文采用稳定渗流情况下的潜水面作为非稳

定渗流的初始值,推导出降雨入渗下潜水面的近似解析解,滑面缓倾(当隔水底板倾角 $\geq 18^\circ$)、低速的滑坡可以用 Dupuit 假设求解得到潜水面解析解,由此产生的误差可控制在 10% 以内^[7]。

6 结 论

(1) 大部分滑坡的水文地质结构为滑坡体统一含水潜水位型,滑坡体含水、滑带相对隔水及外界因素(降雨、地表水入渗、库水位等)变化关系密切的情况下,在横向上一般不易形成统一的地下水位,而在纵向上往往形成统一的地下水浸润曲线。

(2) 随着降雨的进一步进行和包气带内土中所含水分进一步下渗,在相对隔水的滑带处将逐渐形成一自由水面,即潜水面。强降雨入渗易导致滑坡复活。

(3) 当隔水底板倾角不大 18° 时,由于引入 Dupuit 假设而造成的潜水面解析解与精确解的误差在 10% 以内。

(4) 引入 Dupuit 假设而造成的潜水面解析解适用于滑面缓倾低速的滑坡。

参考文献(References)

[1] 谭超.地下水对滑坡的力学作用[D].成都:成都理工大学,2009.
[2] 郑颖人,时卫民,孔位学.库水位下降时渗透力及地下

水浸润线的计算[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3203-3210.

- [3] 冯文凯,石豫川,柴贺军,等.降雨及库水升降作用下地下水浸润线简化求解[J].成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(1):90-94.
[4] 吴琼,唐辉明,王亮清,林志红.库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J].岩土力学,2009,30(10):3026-3031.
[5] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995.
[6] Jacob Bear. Dynamics of fluids in porous media [M]. American Elsevier publishing company, 1972.
[7] 徐建强.阶跃型滑坡变形破坏机理及数学力学模型研究[D].中国科学院武汉岩土力学研究所,2011.
[8] 谢新宇,杨相如,刘开富,等.水位变化对带挡土墙路基稳定性影响[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1262-1266.
[9] 吴越,刘东升,袁兴平.水位下降作用下边坡渗流场及稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1067-1070.
[10] 李治民,聂守智,杨超,袁继国.江南镇滑坡的成因分析与稳定性评价[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1365-1369.
[11] 张友谊,胡卸文.库水位等速上升作用下岸坡地下水浸润线的计算[J].水文地质工程地质,2007,15(5):46-50.

(上接第 385 页)

[2] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
[3] Itasca Consulting Group. PFC2D user's manual [M]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2004.
[4] 周健,池永.土的工程力学性质的颗粒流数值模拟[J].固体力学,2002,25(4):377-382.
[5] 周健,王家全,曾远,等.土坡稳定分析的颗粒流模拟[J].岩土力学,2009,30(1):86-90.
[6] 崔激,刘学昆,戚蓝.大型复杂堆积边坡稳定性的离散元分析[J].工程地质学报,2012,20(2):222-227.
[7] 贺续文,刘忠,廖彪,等.基于离散元法的节理岩体边坡稳定性分析[J].岩土力学,2011,32(7):

2199-2204.

- [8] 周剑,张路青,戴福初,等.基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增1):2650-2659.
[9] Itasca Consulting Group Incorporation. PFC2D augmented Fish Tank [R]. Minnesota: Itasca Consulting Group Incorporation, 2004.
[10] 贺续文.基于离散单元法的节理岩体边坡稳定性分析[D].湘潭:湘潭大学,2010.
[11] 石崇,王海礼,王盛年,等.低应力均孔隙率复杂离散颗粒模型构建方法[EB/OL]. [http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/2013\(3\),397,2013-03-11](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/2013(3),397,2013-03-11).