

降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响

魏 宁¹, 茜平一², 傅旭东¹

(1. 武汉大学 土木与建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 广东水利水电学院, 广州 510635)

摘 要: 降雨入渗降低边坡的稳定性, 蒸发增加边坡的稳定性, 降雨和蒸发对边坡稳定性的定量研究是很有意义的。采用蒸发和降雨模型对边坡进行非饱和-非稳定渗流分析, 用总凝聚力表示的 Bishop 极限平衡法计算边坡安全系数。采用数值方法对算例土质边坡进行了研究, 得到了孔隙水压力随时间变化的关系、边坡安全系数随时间变化的关系。结果显示: 土体中孔隙水压力与天气条件、边坡安全系数与天气条件之间存在滞后关系; 降雨和蒸发对边坡的表层滑动稳定性影响非常大, 对深层滑动稳定性影响相对较小; 降雨过程中边坡的临界滑动面由较深位置向较浅位置转变, 蒸发过程则相反。

关 键 词: 非饱和土; 非饱和-非稳定渗流; 边坡稳定; 降雨和蒸发; 有限单元法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Effects of rainfall infiltration and evaporation on soil slope stability

WEI Ning¹, QIAN Ping-yi², FU Xu-dong¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: It is advantageous to know how much rainwater decreases or evaporation increases the stability of a soil slope. Numerical model was used to quantify the effect of rainwater and evaporation on the stability of a case slope. With raining model and evaporation model, unsaturated-unsteady seepage analysis was used to calculate pore pressure of the case slope, and Bishop Equilibrium balance method with total cohesion was used to calculate the stability factor of the case slope. Relationships between the pore pressure and time, between the safety of stability and time were obtained. Results show that changes in slope stability and pore pressure lag behind the change of weather; infiltration and evaporation affect the stability of shallow slip surface greatly, the stability of deep slip surface relatively little; in the process of rain, the critical slip surface changes from deep surface to relative shallow surface, in the process of evaporation, the situation is opposite.

Key words: unsaturated soil; unsaturated -unsteady seepage; slope stability; rainfall and evaporation; FEM

1 引 言

我国南方以及中南、西南部分地区广泛地分布着膨胀土、残积土等黏性土。这些地区的山地或人工边坡在雨季常发生滑坡, 而且以浅层滑坡最为多见。这类滑坡产生的机理是由于浅层土多为非饱和和黏性土, 天气变化对其力学性状有很大的影响^[1]。雨水入渗使土体饱和度增加, 土体自重增加, 同时吸力锐减, 并引起抗剪强度大幅度下降^[1]。持续降雨还可引起地下水水位上升或在相对隔水层以上出现暂时性地下水。所以当持续降水的历时和强度超过一定程度时, 则可导致土坡失稳^[1~5]。

本文采用非饱和土渗流理论, 求解出降雨和蒸

发边界条件下的土坡瞬态水压力分布。通过非饱和土基质吸力和其强度之间的关系换算出土坡瞬态抗剪强度参数, 并考虑雨荷载对边坡稳定的不利影响, 结合总凝聚力表示的 Bishop 圆弧滑动法对边坡的稳定性进行分析。尝试对降雨和蒸发与边坡的安全系数之间的关系进行定量分析。

2 非饱和土的渗流控制方程

非稳定-非饱和和渗流问题的基本方程^[6]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{1}{\gamma_w} k_{ij} k_r(p) \frac{\partial p}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(p) \right] = (C(p) + \alpha S_s) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

式中 k_{ij} 为饱和渗透张量; $k_r(p)$ 为相对透水系数; p

为孔隙水压力; γ_w 为水的重度; S_s 为单位贮存量, $S_s = dn/dp$; $C(p)$ 为比容水度; α 为判定饱和、非饱和状态的参数, $\alpha=0$ 时, 计算非饱和和渗流, $\alpha=1$ 时, 计算饱和和渗流。

(1) 压力边界条件

$$p(x, y, z) = \bar{p}(x, y, z) \quad (2)$$

(2) 流量边界条件

$$k_{ij} k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = I \quad (3)$$

(3) 饱和逸出面边界条件

$$p(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

(4) 降雨边界条件

$$\left. \begin{aligned} k_{ij} k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i &= I & (I < f) \\ p &= 0 & (I \geq f) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 I 为降雨强度; f 为土壤入渗率, 不考虑地表积水; h 为压力总水头, $h = p/\gamma_w + x_3$ 。

(5) 蒸发边界条件:

持续热天气长期干旱季节或长期降雨季节, 可认为地表维持在某一含水率 θ (或者某一孔隙水压力 p_L), 可认为 p 与 θ_L 有唯一对应关系:

$$\theta \approx \theta_L \quad (p \approx p_L) \quad (6)$$

当土处于蒸发期时, 表面土的蒸发强度 E 基本保持不变。

$$k_{ij} k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = E \quad (7)$$

一般来说, 蒸发强度不会维持多久, 随着土表层水分失去, 地表蒸发强度要受到土壤供水条件约束, 将过渡到蒸发强度随着土壤含水率的减少而减少的情况, 一般可以视为线性关系^[1]。即

$$k_{ij} k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = a\theta + b \quad (8)$$

式中 a, b 均为系数。

非饱和土渗透参数采用 VG (Van Genuchten) 模型计算。Van Genuchten 将 $\theta-P$ 的关系使用一个数值模式来表示^[7-9]:

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha P)^n} \right]^m \quad (9)$$

式中 $m = 1 - 1/n$; S_e 为有效饱和度; P 为负孔隙水压力。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

式中 θ_s 为饱和体积含水率。

将式 (9) 代入 Mualem 提出的水分特征曲线和非饱和透水系数的数值模式中, 可以得到相对透水系数 k_r :

$$k_r = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (11)$$

可以通过实测的水分特征曲线来求得 VG 模式的 4 个参数 θ_s , θ_r , α , n , 并依次来反映土的非饱和和渗透性质。

3 非饱和土强度理论

非饱和土的孔隙中兼含空气和水。因此, 它的强度特征要比饱和土复杂。由于水、气界面呈弯液面, 因此, 孔隙气压力 u_a 和孔隙水压力 u_w 是不相等的, 且 $u_a > u_w$, 两者的差值等于毛细吸力。当 u_a 为大气压力时, u_w 为负值。在不排水、不排气条件下 u_a 和 u_w 都随外力的增加而增加^[7]。

在非饱和土内任意平面上有 3 个法向应力变量, 即 σ , u_a 和 u_w 。而 3 个变量中任 2 个的组合可用来规定非饱和土的应力状态。Fredlund 推荐用 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 的组合, 这是因为在大多数情况下, 实际问题中孔隙气压力是大气压力, 因而, 总应力变化和孔隙水压力变化的影响可以分开考虑 (图 1), 于是, 非饱和土的强度表达式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (12)$$

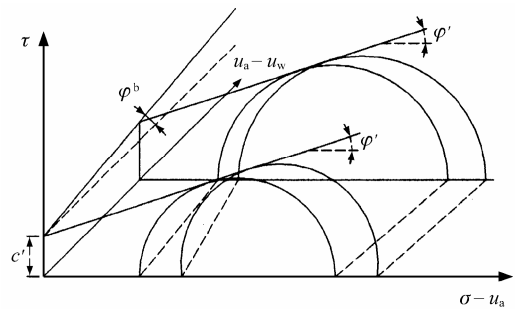


图 1 非饱和土破坏面

Fig.1 Failure envelope for unsaturated soil

4 非饱和土坡稳定性

土坡与大气相通, 则 $u_a = 0$ 。将非饱和土的总凝聚力 $c_i = c'_i + s_i \tan \phi^b$ 代入 Bishop 圆弧滑动法的安全系数公式得

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} [b_i (c'_i + s_i \tan \phi_i^b) + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (13)$$

式中 b_i 为土条宽度; c'_i 和 ϕ'_i 均为滑动面上土条的

有效强度参数; α_i 为滑动面切线与水平面的夹角;
 u_i 为滑动面上正孔隙水压力, 非饱和土区域取 0; s_i
为滑动面上土条的负孔隙水压力, 在饱和土区域取
0。 $m_{ai} = \cos \alpha_i + \tan \phi'_i \sin \alpha_i / F_s$ 。

计算中, 对于非饱和区域的土根据孔隙水压力
分布将同一种土分层, 根据细分土层的平均孔隙水
压力计算非饱和区域土层的总凝聚力和土体的重
度, 利用比较成熟的 Bishop 圆弧滑动方法计算边坡
稳定的安全系数。

5 边坡稳定的数值分析

土质边坡高度为 10 m, 坡度为 1:2。土层分布
见图 2。非饱和土的渗流计算中土水特征曲线采用
VG 模型, 土层参数见表 1。计算中模拟两次降雨,
总降雨量相同, 其中一次为强度较大的暴雨, 强度
为 60 mm/h, 时间为 1 h; 另一次降雨持续时间为

20 h, 强度为 3 mm/h。数值计算结果分析了 5 个
点(图 2 中的 a,b,c,d,e)的孔隙水压力。分析降雨和
蒸发效应对边坡安全系数的影响过程中, 不考虑地
下水水位的变化, 不考虑土体裂隙、雨水对土体表
面冲蚀效应的影响, 计算中假定土-水特征曲线脱湿
曲线和吸湿曲线重合。

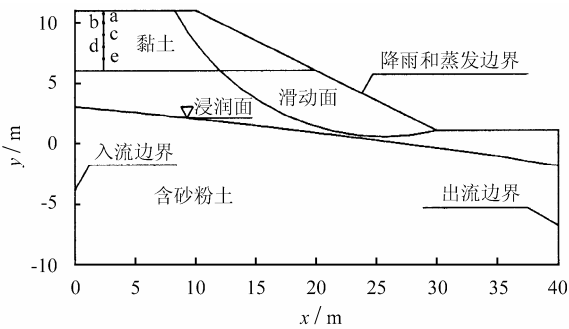


图 2 边坡剖面图

Fig.2 Calculation profile of the case slope

表 1 土层参数
Table 1 Parameters of the case slope

土层	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\varphi^b/(\text{^\circ})$	$\gamma_d/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\gamma_{\text{sat}}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	θ_r	θ_s	α/cm^{-1}	n	$k_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
黏性土	20	19.5	17.5	14.6	18.6	0.10	0.50	0.018	2.1	5×10^{-6}
含砂粉土	10	25	15.0	18.9	21.9	0.00	0.30	0.05	1.6	3.75×10^{-5}

计算采用笔者编制的 WS^{3D} 渗流程序和 STABR
改良程序。本计算模拟小规模的降雨和蒸发, 计算
出了孔隙水压力随时间变化的关系、边坡安全系数
随时间的变化。土体的饱和蒸发强度为 0.333 mm/h
和 0.167 mm/h (随 θ 线性减少), 两次降雨强度为
60 mm/h 和 3 mm/h, 分别持续 1 h 和 20 h (如图 3,
正为降雨, 负为蒸发)。模拟自然情况 360 h (15 d)。
土体重度根据土体体积含水率 θ 在干重度和饱和重
度之间插值。暂态雨荷载考虑由于降雨对边坡产生
的冲击荷载, 考虑雨水垂直速度为 6 m/s, 将降雨冲
击荷载等效为均布荷载竖直作用于边坡, 进行边坡
稳定分析, 渗流计算网格见图 4, 计算结果见图 5~
8, 图 6 为 a→e 段不同时刻负孔隙水压力随高程的
变化关系。

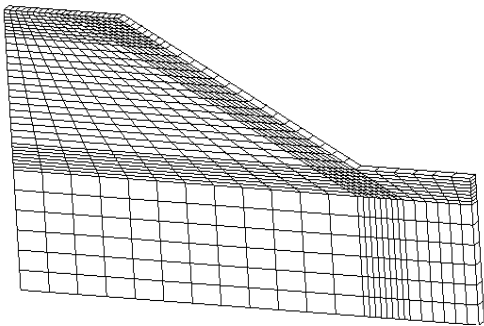


图 4 渗流数值计算采用的有限元网格
Fig.4 FEM grid of the case slope

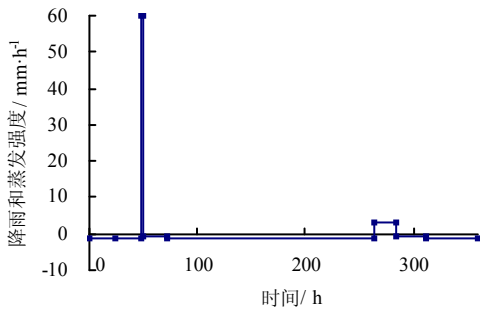


图 3 降雨和饱和蒸发随时间变化曲线

Fig.3 Rainfall and saturated evaporation at different times

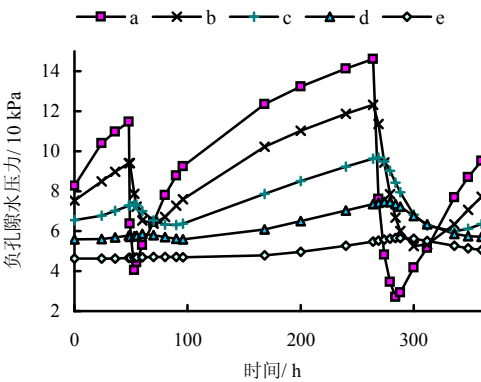


图 5 负孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig.5 Pore-water pressures at different times

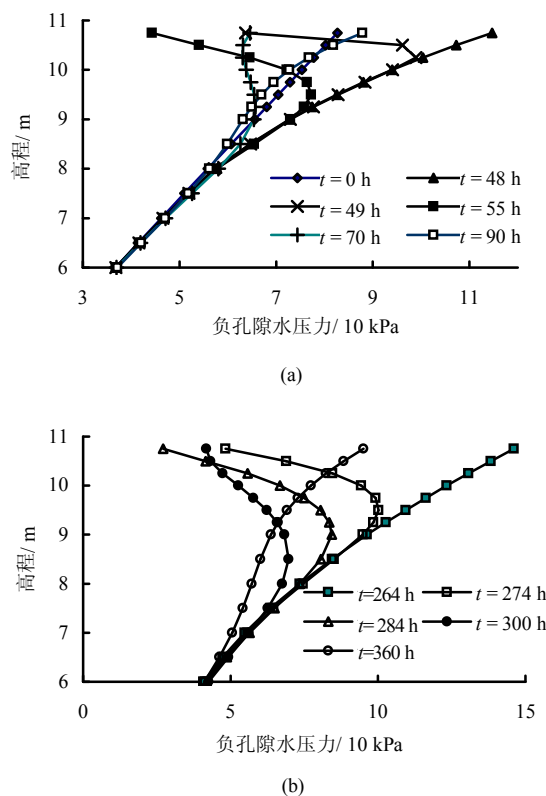


图6 负孔隙水压力随高程的变化关系

Fig.6 Pore-water pressures at different elevations

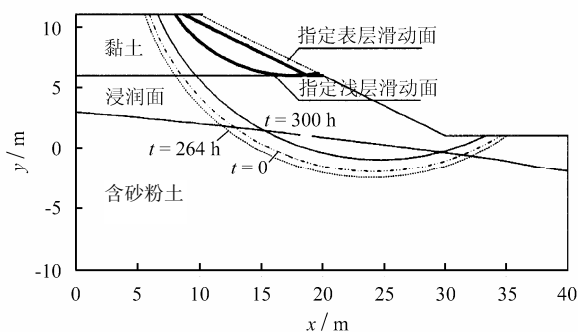


图7 临界滑动面的位置

Fig.7 Position of the critical slip surface

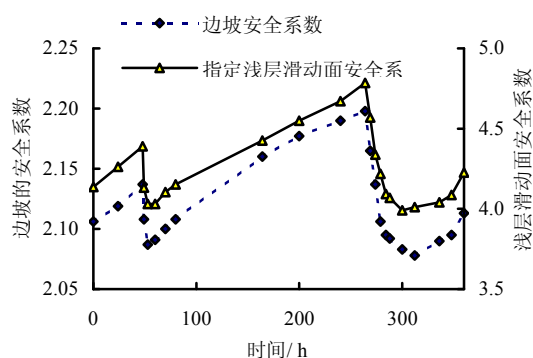


图8 边坡的安全系数随时间的变化曲线

Fig.8 Factor of safety for the case slope at different times

以上计算结果中,指定浅层滑动面的第二次降雨前边坡稳定安全系数为4.78,雨后变成3.99,影响可达16.5%;对于指定表层滑动面,由4.53变成3.06,安全系数改变可达32.4%。由于该边坡的表层滑动面并不是最危险的滑动面,临界滑动面并没有从较深部位变到表层,安全系数变化不是特别大。天气情况对该边坡的稳定安全系数的影响为8%。

降雨产生的雨荷载对滑动面的影响较小,对滑动面的安全系数影响不到1%。水分增加导致的土重度变化,对较深部位滑弧的安全系数影响较小,对浅层滑动面安全系数的改变占总变化量的10%,对表层滑动面占总变化量的30%。由水分变化导致的总凝聚力的变化对边坡的稳定性起最主要作用,土的重度变化的影响次之,雨荷载的影响很小。

边坡土体的孔隙水压力变化相对天气条件变化存在滞后,并且随深度增加,滞后时间增加。开始降雨时,地表一定深度下的水分仍然向上传递,降雨一段时间后,水分才开始由向上变为向下传递。随着距离地表深度增加,这一段滞后时间相应增加,同时天气条件对土体中孔隙水压力变化的影响变小。

由于滞后效应,边坡在降雨结束后,边坡稳定的安全系数仍有一段时间持续降低(降低的幅度不太大),直到滞后效应结束,边坡稳定的安全系数达到最低。随着边坡中水分的蒸发,稳定安全系数变化趋势由变小转变为变大。对于一般降雨条件,边坡(降雨过程中不失稳)最危险的时刻是在降雨完成后的一段时间。

从孔隙水压力随时间变化(图5、图6)、安全系数的变化程度(图8)可以看出:边坡在降雨过程中不失稳的条件下,两次降雨过程,降雨量相同,强度小、时间长的降雨过程对该土坡的孔隙水压力场、稳定性的影响大。

实际的降雨和蒸发过程是非常复杂的。计算是对蒸发和降雨现象近似处理。蒸发计算中蒸发速度比较快,程序有待于改进。

6 结 论

(1) 计算结果显示,降雨入渗降低了边坡的稳定性,而蒸发则可提高边坡的稳定性。天气情况的变化对表层滑动面的稳定性影响很大;对深层滑动面的稳定性影响相对较小。

(2) 边坡土体中孔隙水压力与天气条件、边坡安全系数与天气条件之间存在滞后关系。

(3)降雨过程中和降雨后,随着水分的重分布,边坡临界滑动面由较深滑动面向较浅层滑动面转变;蒸发过程中水分重分布时,则相反。

(4)边坡在降雨过程中不失稳的条件下,两次降雨过程,降雨量相同,强度小、时间长的降雨过程对该土坡的孔隙水压力场、稳定性的影响大。

参 考 文 献

- [1] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 8—12.
CHEN Shou-yi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 8—12.
- [2] Gasmo J M, Tahardjo H, Leong E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope[J]. **Computers and Geotechnics**, 2000, 26(2): 145—165.
- [3] Ng C W W, Shi Q. Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, 1998, 31: 105—113.
- [4] Tsaparas I, Tahardjo H, Toll D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29: 1—27.
- [5] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 447—450.
CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 447—450.
- [6] 朱岳明, 龚道勇, 罗平平. 三维饱和-非饱和降雨入渗渗流场分析[J]. 水利学报, 2003, (12): 66—70.
ZHU Yue-ming, GONG Dao-yong, LUO Ping-ping, Analysis of 3D saturated-unsaturated raining infiltration seepage[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (12): 66—70.
- [7] D G 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] 毛昶熙. 渗流数值计算与数值实现[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [9] 武汉水利电力学院. 农田水利学[M]. 北京: 水利出版社, 1980.