

文章编号:1671-6833(2007)03-0024-04

降雨入渗条件下无限边坡的稳定性分析

刘忠玉¹, 马崇武²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 东莞理工学院, 建筑工程系, 广东 东莞 523808)

摘 要: 用 Iverson 解析解描述降雨入渗, 并采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 对降雨过程中平移模式下无限均质边坡的水平位移进行弹塑性计算, 据此分析边坡安全系数和滑坡前坡面水平位移的关系, 并探讨土坡的抗剪强度参数、降雨强度和初始应力状态对边坡安全系数和水平位移的影响。结果表明, 对于抗剪强度参数较小的无限边坡, 在较大的降雨强度作用时, 滑坡很快会发生, 且滑坡前的水平位移较小, 但初始应力状态对滑坡发生的时间没有影响。

关键词: 无限边坡; 降雨入渗; 安全系数; 水平位移

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

0 引言

在分析边坡稳定性时, 边坡安全系数 F , 是主要的量化指标^[1-7], 而滑坡预报则基本上都是基于坡面或深层位移的监测资料, 因此, 如何建立观测位移与边坡安全系数之间的关系越来越受到重视。对于降雨入渗诱发的滑坡, 要得到坡体位移和安全系数, 合理模拟雨水入渗引起的暂态渗流场是其关键之一。其中, 文献[1-3]引入了有限元法; 文献[4-5]通过对 Richards 方程的适当简化, 给出降雨过程中无限边坡中暂态渗流场的解析解。后者简单实用, 且有较多实例的验证^[6-7]。

为研究降雨入渗条件下边坡的变形与稳定性之间的变化规律, 笔者拟在平面应变条件下, 以发生平移式滑坡前的无限均质边坡为研究对象, 以文献[4]的解析解来描述降雨入渗引起的暂态渗流场, 采用 Mohr-Coulomb 强度理论和相适应的流动法则, 对坡体进行弹塑性分析, 并探讨坡体的抗剪强度参数、初始应力状态、降雨强度对坡面水平位移的影响, 以此初步分析边坡安全系数与坡体位移之间的关系。

1 黏性土无限边坡的计算模式

1.1 基本假定

分析图 1 所示的无限边坡。设坡体厚度为 d , 其下卧层与坡体具有相同的渗透系数 K , 初始地

下水位在地面下 d_w 处, 且平行于坡面。假定:

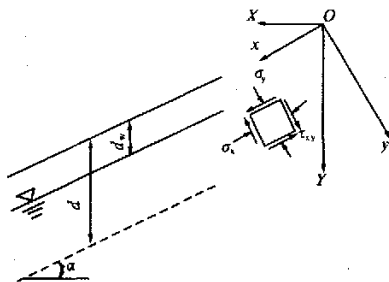


图 1 无限边坡计算模式

Fig. 1 Scheme adopted for the infinite slope

(1) 坡体均匀且各向同性, 为弹性-理想塑性材料, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则, 并遵循相适应的流动法则;

(2) 地下水仅由降雨补给, 不考虑蒸发等损失, 且地下水位以上的土体也完全饱和, 即整个拟滑土体具有相同的重度 γ_{sat} ;

(3) 不计降雨前坡体中的初始应变, 且初始应力状态可用静止侧压力系数 k_0 来描述, 即

$$\sigma'_{x0} = k_0 \sigma'_{y0} \quad (1)$$

式中: σ'_{x0} 和 σ'_{y0} 分别为平行与垂直于坡面的初始有效应力。

1.2 暂态渗流场和安全系数

设降雨强度 I 在整个降雨期间 T 内为不变, 这样, 时刻 t 深度 Y 处的孔压水头为^[4]

收稿日期: 2007-04-19; 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 东莞市 2005 年度科技计划项目 (No. 55)

作者简介: 刘忠玉 (1968-), 男, 博士, 郑州大学教授, 主要从事岩土力学方面的教学和科研工作。

$$\begin{aligned} \phi(Y, t) = & (Y - d_w) \cos^2 \alpha + 2 \frac{I}{K} \sqrt{D_1 t} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{Y}{2\sqrt{D_1 t}} \right) \\ & - 2 \frac{I}{K} H(t - T) \sqrt{D_1(t - T)} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{Y}{2\sqrt{D_1(t - T)}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $D_1 = D_0 \cos 2\alpha$, D_0 为饱和水力扩散系数;
 $H(\eta)$ 为 Heavyside 阶梯函数; 函数 $\operatorname{ierfc}(\eta)$ 定义为

$$\operatorname{ierfc}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2) - \eta \operatorname{erfc}(\eta) \quad (3)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\eta)$ 为互补误差函数。

式(2)求得的孔压水头 $\phi(Y, t)$ 应满足下式:

$$\phi(Y, t) \leq Y \cos^2 \alpha \quad (4)$$

这样, 时刻 t 深度 Y 处的安全系数为^[4-6]

$$F_s(Y, t) = \frac{\tan \varphi' + \frac{c' - \phi(Y, t) \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_{\text{sat}} Y \sin \alpha \cos \alpha}}{\tan \alpha} \quad (5)$$

式中: φ' 和 c' 分别为土体的有效内摩擦角和有效黏聚力; γ_w 为地下水的重度。很明显, 式(5)的最小值即为 t 时刻边坡的安全系数。

1.3 应力和应变计算

参照图 1, 易得深度 Y 处平行于坡面的平面上的正应力和剪应力为

$$\begin{cases} \sigma_y = \gamma_{\text{sat}} Y \cos^2 \alpha \\ \tau_{xy} = \gamma_{\text{sat}} Y \cos \alpha \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

由于时刻 t 深度 Y 处的孔隙水压 $U = \phi \gamma_w$, 所以, 该处的有效正应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma'_y(Y, t) = \sigma_y - \phi(Y, t) \gamma_w \\ \sigma'_x(Y, t) = k_0 \sigma'_{y0} - \phi(Y, t) \gamma_w \end{cases} \quad (7)$$

弹性状态时, 下式成立

$$\frac{\sqrt{(\sigma'_y - \sigma'_x)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{(\sigma'_y + \sigma'_x) + 2c' \cot \varphi'} \leq \sin \varphi' \quad (8)$$

当孔隙水压增大到一定程度后, 深度 Y 处的土体开始屈服, 此时上式中的等号成立。随着孔隙水压力继续增大, 主应力轴将发生偏转, 直到某个深度处的屈服面平行于坡面发生滑坡为止。这期间, 塑性区的应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma'_y = \sigma'(1 - \sin \varphi' \cos 2\theta) - c' \cot \varphi' \\ \sigma'_x = \sigma'(1 + \sin \varphi' \cos 2\theta) - c' \cot \varphi' \\ \tau_{xy} = \sigma' \sin \varphi' \sin 2\theta \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ 表示 y 轴与主应力作用方向的夹角, 并满足下式

$$\frac{\sin \varphi' \sin 2\theta}{1 + \sin \varphi' \cos 2\theta} = \frac{\tau_{xy}}{\sigma'_y + c' \cot \varphi'} \quad (10)$$

对于平移式滑坡, 顺坡向的应变增量 $d\varepsilon_x = 0$,

则应力增量与应变增量之间应满足^[8]

$$\begin{cases} d\sigma'_x = M_{12} d\varepsilon_y + M_{13} d\gamma_{xy} \\ d\sigma'_y = M_{22} d\varepsilon_y + M_{23} d\gamma_{xy} \\ d\tau_{xy} = M_{32} d\varepsilon_y + M_{33} d\gamma_{xy} \end{cases} \quad (11)$$

式中: 系数 $M_{12}, M_{13}, M_{22}, M_{23}, M_{32}$ 和 M_{33} 的表达式见文献[8]。

由于 $d\sigma_y = d\tau_{xy} = 0$, 所以, $d\sigma'_y = dU$, 则

$$d\varepsilon_y = -\frac{M_{33}}{M_{32}} d\gamma_{xy} \quad (12)$$

$$d\gamma_{xy} = -\frac{dU \sin 2\theta \left[\cos 2\theta - \left(1 + \frac{\lambda}{G} \right) \sin \varphi' \right]}{(\cos 2\theta + \sin \varphi')^2 \left(1 + \frac{\lambda}{G} \right)} \quad (13)$$

$$d\sigma'_x = \left(-M_{12} \frac{M_{33}}{M_{32}} + M_{13} \right) d\gamma_{xy} \quad (14)$$

式中: G 为剪切模量; λ 为 Lamé 常数。

当坡体内的应变由式(12)~(13)算出后, 即可得到坡面水平位移 u 。

2 参数分析

以下计算中, 取 $\alpha = 17^\circ$, $d = 4 \text{ m}$, $d_w = 2 \text{ m}$, $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$, $D_0 = 0.004 \text{ m}^2/\text{s}$, $K = 10^{-5} \text{ m/s}$, $\mu = 0.3$, $G = 2 \text{ MPa}$, 且假定降雨历时 t 足够长。

2.1 抗剪强度参数的影响

首先考虑黏聚力 c' 对坡面水平位移 u 的影响。图 2 中, $\varphi' = 25^\circ$, $k_0 = 0.7$, $I = 0.5K$ 。图 2a 表明, c' 越大, 滑坡发生需要的降雨历时越长; 当黏聚力较小(如 $c'/(\gamma_{\text{sat}} d) \leq 0.05$) 时, 随着时间的延续, 坡面水平位移越来越大, 且 $u-t$ 曲线越来越陡, 并且临近滑坡时的坡面位移随黏聚力的增大而增大; 当黏聚力较大(如 $c'/(\gamma_{\text{sat}} d) = 0.08$) 时, 尽管开始时坡面位移随时间而增大, 但一定时间后, 坡面水平位移不再变化, 这种情况下不会发生滑坡。同时, 图 2b 表明, 随着安全系数的减小, 坡面水平位移越来越大, 且 $u-F_s$ 曲线越来越陡, 但是当 F_s 小于某一数值后, 较小黏聚力(如 $c'/(\gamma_{\text{sat}} d) \leq 0.02$) 对应的曲线又变缓, 这意味着此时坡面位移稍有增加, 边坡的安全系数就丧失较多。因此, 对于黏聚力较小时的边坡, 雨水入渗诱发的滑坡具有一定的突发性, 其前兆不明显。

图 3 表示内摩擦角 φ' 的影响。其中, $c'/(\gamma_{\text{sat}} d) = 0.01$, $k_0 = 0.7$, $I = 0.5K$ 。图 3a 表明, φ' 对 u 的影响规律类似于黏聚力。图 3b 中的某些 $u-F_s$

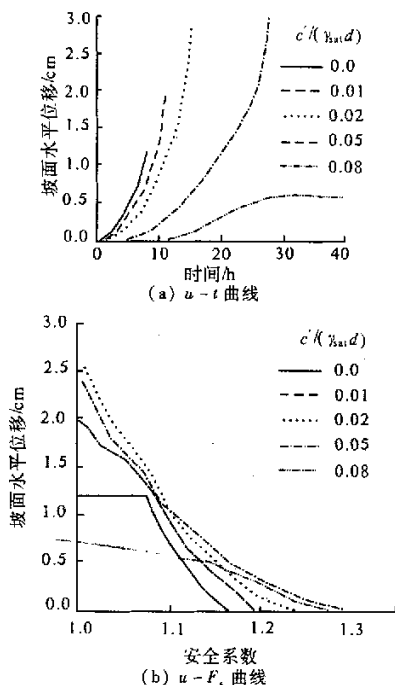


图2 黏聚力对坡面水平位移的影响

Fig.2 Influence of the soil cohesion on the horizontal displacement at ground level

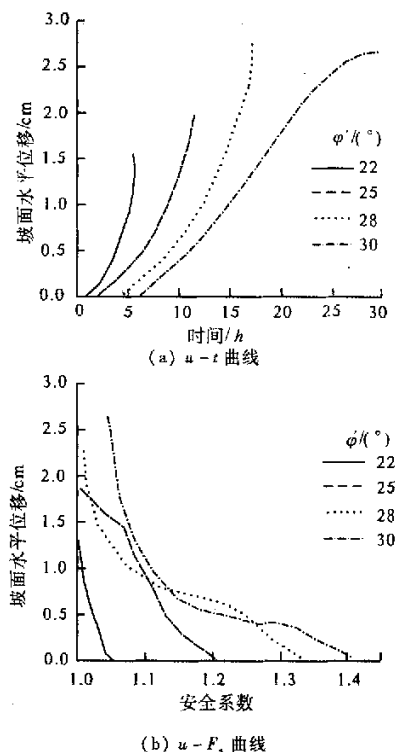


图3 内摩擦角对坡面水平位移的影响

Fig.3 Influence of the internal friction angle on the horizontal displacement at ground level

曲线也明显地分为两段,但是和图 2b 不同的是,这种分段现象出现在内摩擦角较大时.

2.2 降雨强度的影响

图 4 给出了当 $c'/(\gamma_{sat}d) = 0.01$, $\varphi' = 25^\circ$, $k_0 = 0.7$, 而降雨强度 I 不同时的 $u-t$ 曲线和 $u-F_s$ 曲线. 从该图可以看出, I 越小, 滑坡需要的降雨历时越长. 可以预料, 当 I 很小时, 即使降雨历时很长, 滑坡也不会发生. 另外, 当 I 较大 (如 $I > 0.3$) 时, I 越大, 临近滑坡时坡面位移越大, 但是 I 较小 (例如 $I = 0.2, 0.3$) 时, 则正好相反. 图 4b 表明, 对于较大的 I , 其 $u-F_s$ 曲线也可分为 2 段, 且 F_s 较小的那一段比较平缓, 这意味着此时雨水入渗诱发的滑坡也具有突发性.

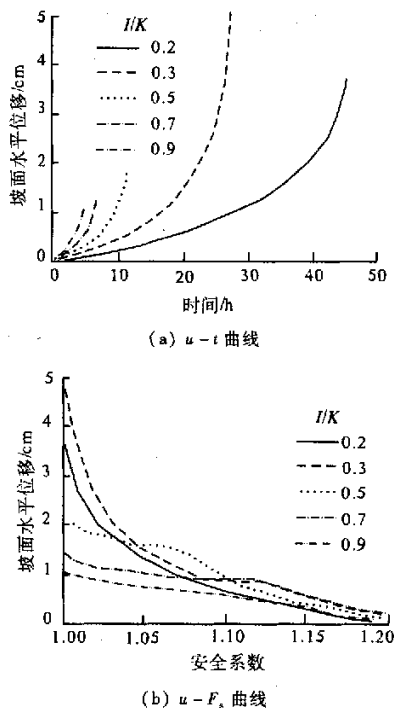


图4 降雨强度对坡面水平位移的影响

Fig.4 Influence of the rainfall intensity on the horizontal displacement at ground level

2.3 初始应力状态的影响

以 k_0 表示初始应力状态. 图 5 中, $c'/(\gamma_{sat}d) = 0.01$, $\varphi' = 25^\circ$, $I = 0.5K$. 很明显, 各条曲线都随时间越来越陡, 且都终止于 $t = 11.51$ h, 即初始应力状态对滑坡发生的时间没有影响, 但是 k_0 越大, 滑坡发生时的坡面位移越小.

3 结论

采用摩尔-库仑强度理论和相适应的流动法

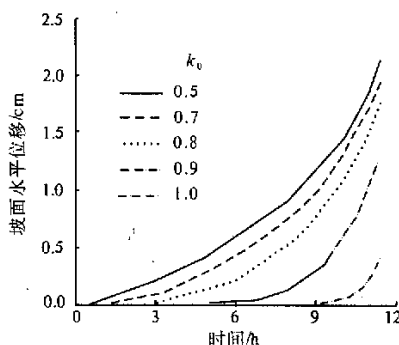


图5 初始应力状态对坡面水平位移的影响

Fig.5 Influence of the initial stress state on the horizontal displacement at ground level

则,计算降雨过程中无限均质边坡的坡面水平位移和安全系数,并探讨了抗剪强度参数、降雨强度和初始应力状态对它们的影响。计算结果表明:

(1)对于给定的边坡,抗剪强度参数越小,或降雨强度越大,滑坡发生就越快,但初始应力状态对滑坡发生的时间没有影响。

(2)当抗剪强度参数较小,或降雨强度较大或静止侧压力系数较大时,临近滑坡时坡面水平位移往往较小,即滑坡的前兆不太明显,这给靠监测坡体变形来预报滑坡带来一定的困难。

(3)当内摩擦角较大,或黏聚力较小,或降雨强度较大时,滑坡的发生具有一定的突发性。

作者仅初步讨论了无限边坡发生平移式滑动的情况,对于坡体中局部发生压缩或伸张的情况是今后进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学,1999,20(1): 1-14.
- [2] 高润德,彭良泉,王 钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江,2001,32(11): 25-27.
- [3] 徐 晗,朱以文,蔡元奇,等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学,2005,26(12): 1957-1962.
- [4] IVERSON R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resources Research, 2000, 36(7): 1897-1910.
- [5] BAUM R L, SAVAGE W Z, GODT J W. TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis[R]. U. S. Geological Survey Open-file Report 02-424, 2002.
- [6] CHEN C Y, CHEN T C, YU F C, et al. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide[J]. Environmental Geology, 2005, 48: 466-479.
- [7] LAN H, ZHOU C, LEE C F, et al. Rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure—A case study of natural terrain landslide in Hong Kong[J]. Science in China (Ser. E) Technological Sciences, 2003, 46(Supp): 52-68.
- [8] URCIUOLI G. Strains preceding failure in infinite slopes[J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2(1): 93-112.

Stability Analysis of Infinite Slopes Under Rainfall Infiltration

LIU Zhong-yu¹, MA Chong-wu²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: This paper gives an analysis of the horizontal displacements that take place in an infinite and homogeneous slope, consisting of an elastic-plastic Mohr-Coulomb material, with the translational slide due to the rainfall infiltration using the Iverson model. An attempt is made to establish a relationship between the horizontal displacement before failure and the slope safety factor. The influences of the initial state of stress, the shear strength of soil and the rain intensity on the slope safety factor and the horizontal displacements are investigated. It is illustrated that, for an infinite slope consisting of the soil with the less shear strength under the greater rainfall intensity, the sliding failure befalls soon and the horizontal displacement before failure is relatively small, while the time of slope sliding failure is not influenced by the initial state of stress.

Key words: infinite slope; rainfall infiltration; safety factor; horizontal displacement