

降雨诱发浅层滑坡渐进破坏分析研究

王正宇¹, 樊辉²

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州省减灾中心, 贵州 贵阳 550001)

[摘要]为分析降雨诱发浅层滑坡的演变过程。本文以湖南湘西古丈滑坡为例,基于 Green-Ampt 入渗模型,进行了降雨诱发浅层滑坡渐进破坏分析。研究表明:在强降雨作用下,滑坡的失稳破坏主要是由于前缘土体以及中前部土体的局部破坏,而逐渐发展为整体破坏。并且,受滑坡地形影响,地形平缓的区域虽然湿润锋下渗较快,土体抗剪强度较低,但由于土体饱和带的渗流作用较小,而重力提供垂直于滑面的分力较大,该部分稳定性较为良好,故湿润锋对于滑坡稳定性的影响还应该根据不同地形条件加以分析。渐进式滑坡破坏分析方法对滑坡的监测和防治具有重要的指导意义。

[关键词]浅层滑坡;降雨入渗;稳定性;渐进破坏

[中图分类号]P642.22 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2021)04-0433-06

1 引言

众多事实表明,降雨是影响边坡稳定性的最主要的环境因素之一,也是引发浅层滑坡触发的关键因素(郭璇,2005;李宁,2012)。我国南方以及中南、西南地区山地或人工边坡在雨季常发生滑坡,这些滑坡灾害中尤以浅层滑坡最为多见且备受关注(刘新喜,2007)。在分析降雨诱发浅层滑坡中,由于滑体的深长比较小,常用无限斜坡模型来进行分析。Pradel 等(Pradel D,1993)研究了均质边坡在长历时、高强度降雨条件下发生的浅层滑坡现象,并提出了无限平面滑动型边坡模型。李秀珍等(李秀珍,2015)利用 Mein-Larson 降雨入渗模型结合无限斜坡模型,分析了短时强降雨和长时小降雨两种情况下的滑坡稳定性变化情况。Muntohar 等(Muntohar A S,2010)利用改进的 Green-Ampt 模型结合无限边坡提出一个计算模型来进行浅层滑坡的分析。但无限斜坡模型假定局部安全情况和整体安全情况相同,每一个条块

的稳定性系数都相等(王宇,2013),这显然与实际情况不符,且没有反映出滑坡的实际演化规律。

渐进破坏分析方法以极限平衡方法为基础,分条块进行滑坡稳定性评价,可以反映滑坡变形破坏的实际情况。Anderson 等(Anderson S A,1995)以加利福尼亚为研究区,提出了应力传递方法来分析降雨诱发泥石流灾害的渐进破坏。Liu (Liu C N,2009)提出了一种考虑应变软化作用的降雨诱发浅层滑坡渐进破坏评价方法。Khan 等(Khan Y A,2011)利用非垂直的条块划分方法,以马来西亚槟城岛为研究区,进行了降雨诱发浅层滑坡的渐进破坏评价。但上述方法都没有考虑湿润锋对于浅层滑坡稳定性的影响,而降雨诱发浅层滑坡的评价准确与否,取决于对降雨入渗过程的刻画能力(刘新喜,2007)。

本文基于 Green-Ampt 入渗模型,同时,考虑了湿润锋以上饱和带的渗流作用以及湿润锋对土体抗剪强度的影响,结合滑坡渐进破坏分析方法,提出了一种降雨诱发浅层滑坡渐进破坏的评价方法。以湖南湘西古丈滑坡为例,分析其在强降雨

[收稿日期]2021-06-03 [修回日期]2021-09-08

[作者简介]王正宇(1984—),男,贵州兴仁人,工程师,长期从事矿产资源勘查、水工环相关技术服务工作。E-mail: 75104996@qq.com。

作用下,滑坡破坏的动态演化规律。

2 滑坡破坏力学模型

2.1 滑坡降雨入渗模型

斜坡降雨入渗过程的分析是准确把握降雨诱发滑坡的关键,据有关研究表明,降雨过程当中,斜坡其上处于饱和状态,且饱和带范围随着降雨的持续进行逐渐向下部扩展。在分析降雨入渗过程中,无限斜坡模型忽略了上坡单元对下坡单元的水量补给作用。事实上,针对每一个条块而言,降雨入渗的过程可以概化为两方面(图1),首先,随着降雨的持续进行,条块内部形成湿润锋,并逐渐向下扩展。饱和带的水分会平行坡体表面向下补给另一个条块,同时产生渗透力的作用(汪丁建,2016)。

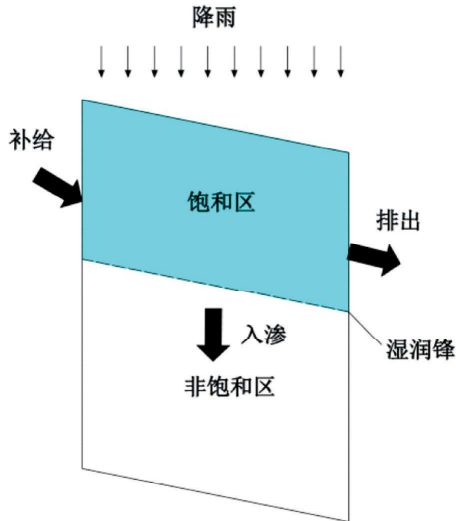


图1 滑坡降雨入渗示意图

Fig. 1 Diagram of rainfall infiltration of landslide

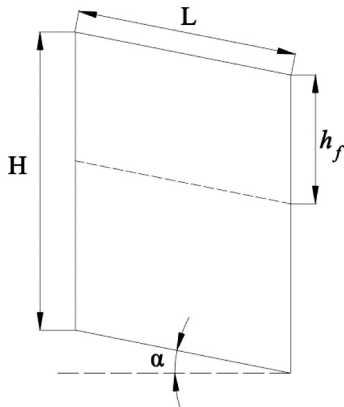


图2 模型简图

Fig. 2 Model sketch

基于 Green-Ampt 模型(许建聪,2005)对降雨入渗过程的假定(图2),根据水量平衡原理和达西定律,强降雨作用下,入渗率可以由下式表达:

$$i = K_s \frac{Z_f^* \cos a + S_f}{Z_f^*} \tag{1}$$

式中: Z_f^* 为湿润锋到坡面的垂直距离(m); i 为入渗率(m/s); K_s 为饱和渗透系数(m/s); S_f 为湿润锋处的吸力水头(m);

降雨初期,地表土体尚未达到饱和,土体内的湿润锋还未形成,此时,降雨强度小于土体入渗能力,入渗边界由降雨控制;随着降雨的持续进行,土体入渗能力开始逐渐下降,在某一时刻 t_p ,降雨强度开始大于土体入渗能力,即湿润锋形成,此时入渗率等于降雨强度,则 t_p 时刻的湿润锋深度以及累积入渗量可以由式(2)、(3)表达:

$$Z_p = \frac{S_f}{(q/K_s - 1) \cos a} \tag{2}$$

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{(q/K_s - 1) \cos a} \tag{3}$$

相应的,湿润锋形成的时间 t_p 可以用式(4)表达:

$$t_p = \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{q(q/K_s - 1) \cos^2 a} \tag{4}$$

根据累积入渗量与入渗率的相互关系,可以得到:

$$i = \frac{dI}{dt} = (\theta_s - \theta_i) \frac{dz_f^*}{dt} \tag{5}$$

将(1)带入(5)我们可以得到湿润锋向下扩展的速率为:

$$\left(\frac{dz_f^*}{dt}\right)_1 = K_s \frac{Z_f^* \cos a + S_f}{(\theta_s - \theta_i) z_f^*} \tag{6}$$

另一方面,饱和带的水分会平行坡体表面向下补给另一个条块,使得湿润锋入渗深度相对减小,同时,被补给的条块湿润锋深度相对增加。根据达西定律,我们可以得到:

$$K_s \sin \beta z_f^* dt = (\theta_s - \theta_i) L dz_f^* \tag{7}$$

因此,湿润锋深度随时间的相对减少量为:

$$\left(\frac{dz_f^*}{dt}\right)_2 = K_s \frac{Z_f^* \sin a}{(\theta_s - \theta_i) L} \tag{8}$$

故在不考虑上坡条块补给量的情况下,湿润锋实际的扩展深度为:

$$\frac{dz_f^*}{dt} = \frac{K_s \frac{-(Z_f^*)^2 \sin a + Z_f^* L \cos a + L S_f}{Z_f^*}}{(\theta_s - \theta_i) L} \tag{9}$$

对式(9)进行积分并代入初始条件 $t=t_p, Z_f^* = z_p$, 我们可以得到:

$$\begin{cases} t-t_p = \frac{(\theta_s - \theta_i)L}{K_s \sin a} \left[\frac{B}{A-B} \ln \left(\frac{Z_f^* + B}{Z_p + B} \right) - \frac{A}{A-B} \ln \left(\frac{Z_f^* + A}{Z_p + A} \right) \right] \\ A = \frac{L \cos a}{2 \sin a} + \frac{\sqrt{L^2 \cos^2 a + 4LS_f \sin a}}{2 \sin a} \\ B = \frac{L \sin a}{2 \sin a} - \frac{\sqrt{L^2 \cos^2 a + 4LS_f \sin a}}{2 \sin a} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)反映了在不考虑上坡条块补给量的情况下,湿润锋的扩展深度。但想要最终求得单个条块的实际扩展深度,还需要考虑上坡条块的补给量。故对式(8)单独进行积分并带入初始条件 $t=t_p, z_f^* = z_p$, 我们可以得到:

$$t-t_p = \frac{(\theta_s - \theta_i)L}{K_s \sin a} \ln \left(\frac{z_f^*}{z_p} \right) \quad (11)$$

某一时刻,假定第 i 条块式(10)的数值解为 $(Z_f^*)_i$, 式(11)的数值解为 $(z_f^*)_i$, 则第 i 条块实际的湿润锋扩展深度为:

$$(z_f^*)_i = (z_f^*)_i + (z_f^*)_{i-1}^2 \quad (12)$$

2.2 滑坡渐进式破坏模型

滑坡渐进破坏计算时,条块的受力情况如图 3 所示:

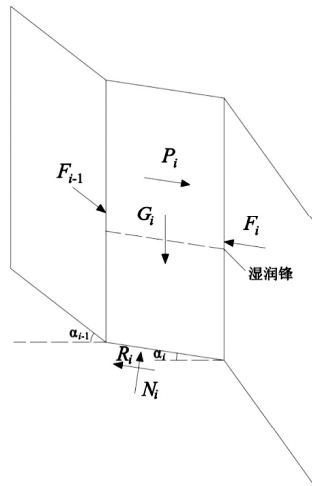


图 3 滑坡条块受力简图

Fig. 3 Block force diagram of landslide

土体抗剪强度准则的选择是进行极限平衡法分析滑坡稳定性的基础。目前,针对非饱和土体的抗剪强度计算,最为常用的就是 Fredlund 提出的扩展的 Mohr-Coulomb 准则,采用相互独立的双应力状态变量(Fredlund D G, 1993),即:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (13)$$

由于基质吸力和正应力是相互独立的状态变

量,因此可以将基质吸力作为对粘聚力的贡献^[16]:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + c_\psi \quad (14)$$

式中: c_ψ 为表观粘聚力。

降雨入渗过程中,土体内的含水率处于非均匀状态,湿润锋以下处于非饱和状态,以上处于饱和状态。滑坡土体所处的物理状态较为复杂,为了便于分析,Montrasio (Montrasio L, 2008) 通过大量的室内实验,提出了一种简化的抗剪强度计算模型。该模型将土条块简化为新的含水率均匀土条块进行计算,有效内摩擦角不变,表观粘聚力满足如下关系:

$$c_\psi = AS_r(1-S_r)^\lambda(1-\eta)^x \quad (15)$$

式中: A, λ 一般为试验获取的参数值; S_r 为土体饱和度; η 为饱和层的厚度比,即 $\eta = h_f/H$; 为饱和层的竖向高度, x 为试验参数,根据文献一般取 3.4。由于表观粘聚力与湿润锋的深度有关,故每一个条块的表观粘聚力会不同。

滑坡渐进破坏的计算主要以条块的安全余度为基础,即条块所受的下滑力与抗滑力之差。将各条块的受力分解为该条块平行滑面方向上和垂直滑面方向上的两个分力,则第 i 条块的下滑力为:

$$S_i = G_i \sin \alpha_i + P_i + F_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - F_i \quad (16)$$

第 i 条块的抗滑力为:

$$R_i = N_i \tan \phi'_i + (c' + c_\psi)_i l_i \quad (17)$$

第 i 条块滑体在滑面法线上的分力为:

$$N_i = G_i \cos \alpha_i + F_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (18)$$

其中, G 为竖直向下的重力:

$$G = \gamma_s h_f l \cos \alpha + \gamma(H - h_f) l \cos \alpha \quad (19)$$

式中: γ_s, γ 分别为土体饱和重度和自然条件下的重度。

P 为由于饱和带渗流作用产生的渗透力:

$$P = \gamma_w h_f l \sin \alpha \cos \alpha \quad (20)$$

式中: γ_w 为水的重度。

合力 F_i, F_{i-1} 分别代表第 i 条块两侧相邻条块的作用, F_i 反映了第 $i+1$ 至第 n 条块对 i 条块的挤压作用, F_{i-1} 为第 1 至第 $i-1$ 条块的剩余推力,是第 1 至第 $i-1$ 条块主动施加于 i 条块的。故:

$$F_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} [G_j \sin \alpha_j + p_j - (c' + c_\psi)_j l_j - N'_j \tan \phi_j] \quad (21)$$

$$F_i = \sum_{j=i+1}^n [(c' + c_\psi)_j l_j + N'_j \tan \phi_j - G_j \sin \alpha_j - P_j] \quad (22)$$

$$N'_j = G_j \cos \alpha_j \quad (23)$$

由于条块不能主动向上部条块挤压,因此条

块间力 F_i 、 F_{i-1} 若小于零则取零。

由公式(16)至(22),任意一个条块的安全余度和稳定性系数可以表示为:

$$Z_i = (c' + c_\psi)_i l_i + N_i \tan \phi_i - S_i \quad (24)$$

$$F_{si} = \frac{(c' + c_\psi)_i l_i + N_i \tan \phi_i}{S_i} \quad (25)$$

3 滑坡实例

2016年7月17日12时零5分,受持续性强降雨影响,湖南省湘西土家族苗族自治州古丈县墨戎镇龙鼻村九组附近山体发生滑坡,损毁房屋5栋14间(图4)。由于预警及时、处置果断,在灾害发生前15分钟成功转移群众500余人,无一人伤亡。



图4 滑坡全貌

Fig. 4 Landslide panorama

滑坡宽约40 m,坡面坡度约45°,滑体厚度约3 m,方量约1万立方米,主要由松散堆积体组成。根据剖面形态(图5),将滑体概化成如图6所示的形状,假定滑动面与坡面平行,滑体厚度为3 m,且将滑体划分为63个条块,同时,将条块由上之下依次编号1-63,各个条块的长度大致相同。

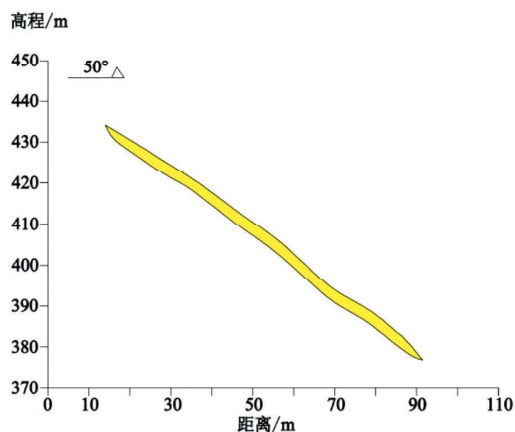


图5 滑坡剖面图

Fig. 5 Landslide profile

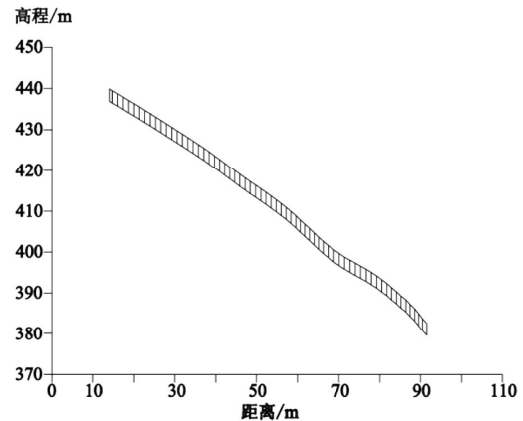


图6 概化模型简图

Fig. 6 Generalized model diagram

计算过程中,每一个条块的几何参数可以从剖面图中获取,包括:条块的坡长和坡角。土体的水文力学参数见表1所示,土体的物理力学参数见表2所示。由于条块不能主动向上部条块挤压,因此条块间力 F_i 、 F_{i-1} 若小于零则取零。降雨强度根据当天5小时的累计降雨量203.5 mm,即降雨强度为40.7 mm/h。

表1 水文力学参数

Table 1 Hydrological mechanics parameters

初始含水率/%	饱和含水率/%	饱和渗透系数/ $m \cdot s^{-1}$	湿润锋处的 基质吸力/m
0.3	0.43	5.78×10^{-6}	0.06

表2 物理力学参数

Table 2 Physical mechanics parameters

自然重度/ $kN \cdot m^{-3}$	饱和重度/ $kN \cdot m^{-3}$	有效粘聚力/kPa	有效内摩擦角/°	孔隙度
16.2	19	7.5	22.4	0.48

4 结果分析

在持续降雨作用下,湿润锋逐渐向下部扩展,由于每一个条块的几何尺寸不同,相同时间里,每一个条块中的湿润锋扩展深度各不相同(图7),扩展深度较大的位置主要集中在地形平缓的区域,扩展深度较小的位置主要集中在地形陡峭的区域。这主要由于地形平缓的位置容易形成汇水区,降雨条件下容易形成向下的渗流作用,同时,上坡单元向下坡单元的补给作用也相对较弱。

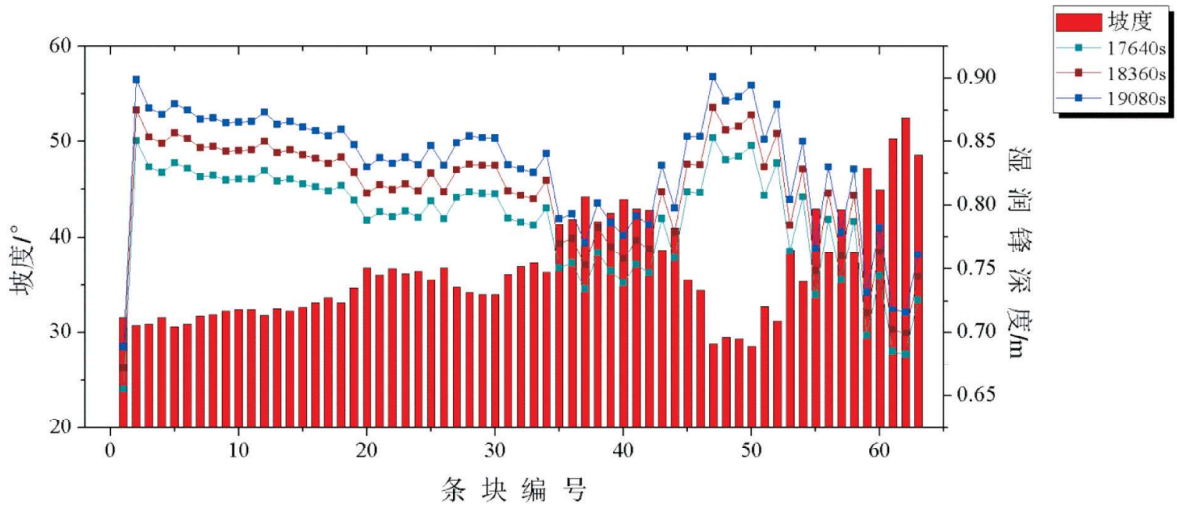


图 7 不同时刻各条块湿润锋下渗深度与坡度的关系

Fig. 7 Relation of slope and each block wetting front infiltration depth in different time

下图反映了,不同时刻各个条块安全余度的变化情况(图 8)。条块安全余度越大,滑坡越偏稳定。从图中可以看出,随着降雨的不断进行,各个条块的安全余度逐渐减小,可见受降雨影响,滑坡稳定性逐渐变差。

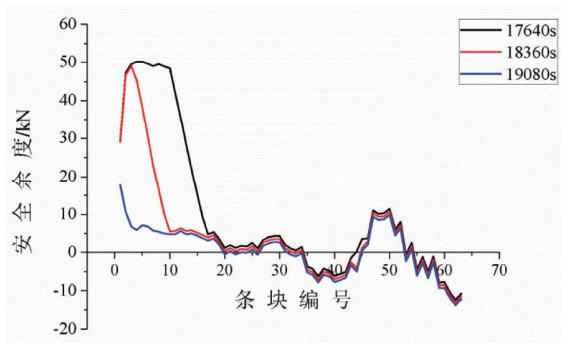


图 8 不同时刻各条块的安全余度变化情况

Fig. 8 The change of the safety redundancy of each block in different time

根据滑坡各个条块稳定性的大小,将滑坡稳定性状态分为 4 个级别:

表 3 滑坡稳定性分级表

Table 3 Classification of landslide stability

滑坡稳定性系数	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

根据条块稳定性级别,画出滑坡随着降雨持续进行下的渐进破坏发展图(图 9)。从图中可以看出,滑坡首先发生破坏的条块为前缘和中前部,其他条块稳定性良好,随着降雨的持续进行,滑坡

中后部分的条块稳定性逐渐减小,直至破坏。由此可见,该滑坡的破坏是由局部开始,逐渐向整体破坏发展。其破坏过程与文献(张玉恩,2020)中分析和描述的结果相一致。

值得注意的是,滑坡体中前部平缓的区域,是降雨过程当中的汇水区,湿润锋下渗最快的部分,由于该部分地形平缓,土体饱和带的渗流作用较小,渗透力较小,而重力提供垂直于滑面的分力较大,故在降雨期间,该部分的土体一直处于稳定状态,但前缘条块一旦失稳,该部分由于缺少支挡,有较好的临空面,破坏逐步向后缘扩展,形成牵引式滑坡。

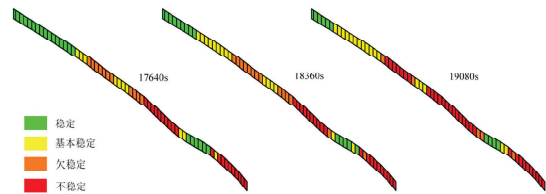


图 9 不同时刻下滑坡稳定性状态图

Fig. 9 Landslide stability state diagram in different time

5 结论

(1)通过计算分析,在降雨作用下,滑坡的失稳破坏主要是由于前缘土体以及中前部土体的局部破坏,而逐渐发展为整体破坏。

(2)受滑坡地形影响,地形平缓的区域虽然湿润锋下渗较快,土体抗剪强度较低,但由于土体饱和带的渗流作用较小,渗透力较小,而重力提供垂

直于滑面的分力较大,在降雨期间,该部分的土体一直处于稳定状态,故湿润锋对于滑坡稳定性的影响还应该根据不同地形条件加以分析。

(3)通过比较条块的稳定性和整体的稳定性可知,虽然滑坡的整体稳定性良好,但局部的条块可能已经达到了不稳定的级别,也会引起滑坡由局部到整体的失稳。

(4)基于降雨诱发浅层滑坡渐进破坏的分析方法可以更全面地了解在降雨条件下滑坡最易出现初始破坏的部位,即滑坡稳定性最小的位置,在进行降雨诱发浅层滑坡变形阶段的监测预警中,通过了解潜在的初始破坏位置及变形方式,可以指导关键性监测点的布设,有助于监测和防治工作的进行。

[参考文献]

郭璇,赵成刚,于威威. 2005. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报,15(1):14-18.

李宁,许建聪,钦亚洲. 2012. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学,33(5):209-214.

李秀珍,何思明. 2015. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J]. 灾害学,30(2):16-20.

刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等. 2007. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学,28(8):1705-1709.

王宇,李晓,张搏,等. 2013. 降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J]. 水利学报,44(4):416-425.

汪丁建,唐辉明,李长冬,等. 2016. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学,37(2):439-445.

许建聪,尚岳全,陈侃福,等. 2005. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,24(18):3246-3251.

张玉恩. 2020. 古丈县龙鼻村泥石流启动机制与运动特征研究[D]. 中国地质大学.

Anderson S A, Sitar N. 1995. Analysis of Rainfall - Induced Debris Flows[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 121 (7) : 544 -552.

Fredlund D G, Rahardjo H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York:John Wiley and Sons.

Green W H, Ampt G A. 1911. Studies on soil physics; Flow of air and water through soil[J]. Journal of Agricultural Science,4:1-24.

Khan Y A, Lateh H. 2011. Failure Mechanism of a Shallow Landslide at Tun-Sardon Road Cut Section of Penang Island, Malaysia [J]. Geotechnical and Geological Engineering,29(6):1063.

Liu C N. 2009. Progressive failure mechanism in one-dimensional stability analysis of shallow slope failures[J]. Landslides,6(2):129-137.

Montrasio L, Valentino R. 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 8(5):1149-1159.

Muntohar A S, Liao H J. 2010. Rainfall infiltration; infinite slope model for landslides triggering by rainstorm [J]. Natural Hazards, 54 (3):967-984.

Pradel D, Raad G. 1993. Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 119(2):315-332.

Rahardjo H, Lee T T, Leong E C, et al. 2005. Response of a residual soil slope to rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal,42(2):340-351.

Research on the progressive failure of rainfall-induced shallow landslide

WANG Zheng-Yu¹, FAN Hui²

(1.105Geological Party, Guizhou Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, Guizhou, China; 2.Guizhou Disaster Reduction Center, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[Abstract] In this paper, based on the Green-Ampt infiltration model, considering the seepage effect of the saturated zone above the wet front and the influence of the wet front on the shear strength of the soil, combined with the landslide progressive failure analysis method, a rainfall-induced shallow landslide progressive failure analysis method is proposed. Taking Guzhang landslide in Xiangxi, Hunan Province as an example, the deformation and failure development of the landslide under heavy rainfall is analyzed. The results show that the instability and damage of the Guzhang landslide is mainly due to the partial damage of the front soil and the middle and front soil, which gradually develops into an overall damage under the heavy rain. Affected by the landslide terrain, terrain flat areas while wetting front infiltration faster, the shear strength of soil is low, but due to the effect of seepage of the soil saturated with smaller, gravity to provide component perpendicular to the sliding surface is larger, the partial stability is relatively good, so the influence of wetting front for landslide stability should also be analyzed according to different terrain conditions. The method of progressive landslide damage analysis has important guiding significance for landslide monitoring and prevention.

[Key Words] Shallow landslide; Rainfall infiltration; Stability; Progressive failure