

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.003

# 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响

孔郁斐<sup>1</sup>, 宋二祥<sup>1</sup>, 杨 军<sup>1</sup>, 张龙英<sup>2</sup>, 施洪刚<sup>2</sup>, 刘 剑<sup>2</sup>

(1. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国建筑股份有限公司, 北京 100000)

**摘 要:**研究降雨入渗对边坡稳定性的影响规律。采用有限元法进行非饱和土边坡的二维非稳态渗流计算,考虑基质吸作用利用极限平衡法进行非饱和土边坡稳定安全系数计算,进而通过算例计算,分析了降雨过程中及降雨之后,边坡内孔隙水压分布、潜在滑裂面位置以及边坡稳定安全系数的变化情况。着重分析了降雨强度和降雨持续时间的影响,并特别注意分析降雨结束后的边坡稳定性。算例表明某些情况下边坡安全系数最小值出现在降雨之后的数小时或数天,而非降雨的过程中或降雨刚刚结束之时。

**关键词:**非饱和土;降雨;降雨入渗;土坡稳定

**中图分类号:**TU 433 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0016-06

## Rainfall's Effect on the Stability of Unsaturated Slopes

Kong Yufei<sup>1</sup>, Song Erxiang<sup>1</sup>, Yang Jun<sup>1</sup>, Zhang Longying<sup>2</sup>, Shi Honggang<sup>2</sup>, Liu Jian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of the State Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;  
2. China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100000, P. R. China)

**Abstract:** Aimed to analyze the influence of rainfall on slope stability. The finite element method (FEM) is used for the calculation of 2-D transient seepage in the unsaturated slope, while the method of limit equilibrium is used for computing its safety factor. The change of pore water pressure, slip surface and safety factor are investigated through numerical calculations with consideration of various intensity and duration of rainfall. Special attention has been paid to slope stability after rainfall. It is found that sometimes the minimum safety factor may occur several hours or several days after the rainfall, instead of the time during the rainfall or when the rain just stops.

**Key words:** unsaturated soil; rainfall; rainfall infiltration; slope stability

降雨导致的滑坡是一种常见的自然灾害,在广东、广西、云贵川等地,降雨引至的滑坡时有发生,社会影响重大。近年来我国频繁遭遇强降雨等极端天气,由此引发的滑坡灾害越来越为人们所关注。所以分析降雨影响下的边坡稳定性是很值得重视的课题。

通常地下水位以上的土是非饱和土,它具有异于饱和土的特殊性质——降雨时边坡中非饱和土的

饱和度逐渐上升,与此同时土的强度降低、渗透性增加,边坡变得更加危险。从 20 世纪开始,国际上便已展开针对非饱和土及非饱和土边坡的分析研究<sup>[1]</sup>。已有研究涵盖了很多方面,如非饱和土性质、稳态渗流条件下边坡稳定性分析、降雨过程中坡体内基质吸力分布及稳定性的变化等。研究方法包括足尺模型试验,缩尺模型离心机试验、数值模拟等。实验方面, Moriawaki 等<sup>[2]</sup>、林鸿州等<sup>[3]</sup>都在足尺实

收稿日期:2013-03-25

作者简介:孔郁斐(1991-),男,博士生,主要从事岩土工程研究,(E-mail)kyf12@mails.tsinghua.edu.cn。

宋二祥(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)songex@mail.tsinghua.edu.cn。

验中实现了边坡的降雨型破坏,实验结果与真实情况很接近;张建民等<sup>[4]</sup>、Ling等<sup>[5]</sup>分别进行过含软弱层边坡和长边坡的离心机实验,利用人工降雨让边坡破坏,发现了特殊边坡的破坏模式和规律。数值计算方面,也有很多研究者做了很多工作,例如Ng等<sup>[6]</sup>研究了降雨量、降雨持时对边坡稳定性的影响,通过计算发现当总降雨量一定时,降雨持续时间会对降雨结束时的安全系数有显著影响,且存在一个临界持时,当持时等于临界值时土坡稳定安全系数最小。Tsaparas等<sup>[7]</sup>利用假想的边坡分析了降雨量、降雨持时、初始水位、渗透性对降雨诱发滑坡的影响,发现上述参数的取值对计算结果影响较大。进行这类问题的数值计算,可采用有限元法或简化方法进行非稳态渗流计算<sup>[8-9]</sup>,用极限平衡法或强度折减有限元法进行边坡稳分析<sup>[10-11]</sup>。

前人的研究和计算已经覆盖了非饱和土边坡稳定性分析的很多方面,也曾研究过降雨过程中边坡稳定性的变化<sup>[12]</sup>,不过鲜有人关注雨后的情况。本文不仅考虑了降雨过程中,还分析了降雨结束后边坡稳定性的变化,展示了一个全过程。通过一个典型边坡的计算发现:虽然降雨过程中边坡的安全系数逐渐减小,但是雨停的时刻并不一定是安全系数最低的时刻,雨后随着雨水继续下渗,边坡安全系数还有可能在较长时间内继续减小。

## 1 非饱和土理论和边坡稳定分析方法

### 1.1 非饱和土基质吸力

土是三相体,土中水压和气压分别为 $u_w$ 和 $u_a$ 。非饱和土中, $u_w$ 低于 $u_a$ , $(u_a - u_w)$ 被称作基质吸力,记作 $\Psi$ (单位:kPa)。一般若空气相互连通,可认为 $u_a = 0$ , $\Psi = -u_w$ 。此时孔隙水压为负,基质吸力为孔隙水压的绝对值。在饱和土中 $u_a = u_w \geq 0$ , $\Psi = u_a - u_w = 0$ 。后文中为描述方便,在同时涉及饱和区和非饱和区时使用“孔隙水压”一词,非饱和区的基质吸力等于孔隙水压的绝对值;强调非饱和区的变化特征时使用“基质吸力”一词,对应的孔隙水压等于基质吸力的相反数。

非饱和土的基质吸力 $\Psi$ 与体积含水率 $\theta_w$ 相关,其关系曲线为土水特征曲线,需由实验测得。图1为Ng等<sup>[6]</sup>算例中使用的香港某种崩积土的土水特征曲线<sup>[6]</sup>,当 $\Psi$ 在0~20 kPa时,较小的吸力变化对应较大的含水率变化;而 $\Psi$ 在20~100 kPa之间时,基质吸力对含水率的变化非常敏感。本文的计算中就使用这种崩积土的参数。

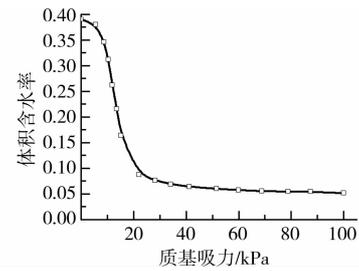


图1 1种香港崩积土的土水特征曲线(Ng和Shi,1998)

### 1.2 非饱和土强度

非饱和土的强度准则与饱和土略有不同,需考虑基质吸力。降雨后土的含水量增加,基质吸力减小、强度降低,基质吸力对强度的影响是非线性的,相关的理论有基于Bishop有效应力的强度准则、Fredlund双线性强度准则、Fredlund非线性强度公式等<sup>[13]</sup>。

其中最常用的是Fredlund等提出的非饱和土的双线性强度准则(扩展摩尔库伦强度准则):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (1)$$

式中: $c'$ 为粘聚力; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力; $\varphi'$ 是与净法向力对应的内摩擦角; $\varphi_b$ 是与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 对应的等效内摩擦角。实际上非饱和土的强度并非随着基质吸力线性变化, $\varphi_b$ 也并非常数,但在基质吸力变化不大时可以假设 $\varphi_b$ 为常数。

### 1.3 降雨入渗计算

非饱和土中的渗流遵循Darcy定律:

$$v_w = -k_w i_w \quad (2)$$

$k_w$ 是非饱和土中水的渗透系数,在同种土中渗透系数 $k_w$ 随含水率的增大而增大(随基质吸力减小而增大),其函数关系 $k_w(\theta_w)$ (或 $k_w(\Psi)$ )是土的渗透性函数,图2为即图1的崩积土的渗透性函数,饱和渗透系数为 $4.8 \times 10^{-5}$  m/s。雨水入渗时的渗流是瞬态流,若不考虑水的压缩性、不考虑渗流和固结耦合,则二维的非饱和土微元中的渗流微分方程为:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = -\frac{k_{wx}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{k_{wy}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + Q \quad (3)$$

式中 $Q$ 为流量边界条件,含水率 $\theta_w$ 随时间 $t$ 变化。要进行完整的计算,需要初始基质吸力分布、边界条件和土性参数等3类条件。

基质吸力分布或含水量分布是计算的初始条件,天然土层的吸力分布存在较大的随机性<sup>[14]</sup>,它与土的性质、周边环境以及水文历史有关,可以通过实地测量或经验估计来获得<sup>[15]</sup>,也可根据长期的气象条件,利用软件进行模拟给出其估计。易知,若上

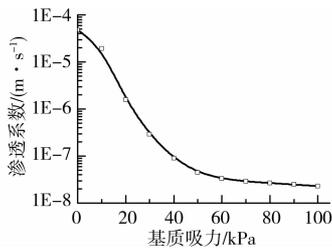


图 2 崩积土的渗透系数与基质吸力的关系  
(Ng 和 Shi, 1998)

表面降雨量与蒸发量均为 0, 地下水面以上基质吸力将呈直线分布; 但自然状态下土的基质吸力一般有上限, 霜露、植被等自然环境的影响可以使得在相当的深度范围内基质吸力为常数, 故通常可认为基质吸力在水面以上一定范围呈直线分布, 某点的基质吸力水头等于该点到水面的距离, 到达上限后, 基质吸力与高度无关、为常数。

计算中边界条件的选取与地质情况、降雨量等有关。如果雨水能够全部从上表面入渗, 不产生地表径流, 则入渗的速度等于降雨速率, 计算中上表面使用流量边界条件(第 2 类边界条件); 如果因降雨量较大或土体渗透性较小, 雨水不能全部入渗, 则可能产生地表径流, 流过的区域表面几乎处于饱和状态, 使用水头边界条件(第 1 类边界条件), 令表面压力水头为 0。除上述 2 种情况外, 降雨时还可能出现更为复杂的情况, 可酌情适当偏于保守地简化处理, 或者进行考虑地表径流的更复杂的计算。

本文的渗流分析使用数值计算软件 GeoStudio 2007 的地下水渗流分析模块 SEEP/W, 计算 1 个均质的边坡, 不考虑地表径流, 用有限元法计算渗流过程中的瞬态孔压, 进而得出不同时刻的孔隙水压力分布或基质吸力分布。

#### 1.4 边坡稳定分析

基于渗流计算结果及土体强度参数可以进行极限平衡法或强度折减有限元法的边坡稳定性计算。极限平衡法将滑体划分为较多土条, 通过静力分析判断边坡的稳定性, 计算滑动力与抗滑力的比值、滑动力矩与抗滑力矩的比值得到安全系数。常用的极限平衡法包括: 瑞典条分法、简化毕肖甫法、简布法、Morgenstern-Price 法(简称 M-P 法)等等。本文计算中使用 M-P 法, 它是一种严格条分法, 同时考虑了力的平衡和力矩的平衡; 在建立极限平衡方程时, 同时考虑土条间法向力和切向力, 并建立反映二者关系的条间力函数  $X = E\lambda f(x)$ 。力安全系数与力矩安全系数随着条间力函数权重  $\lambda$  的变化而变化, M-P 法的安全系数位于这两条曲线的交点, 该方法

适用于计算包括圆弧滑裂面在内的任意滑裂面。

## 2 边坡在降雨全过程中的状态变化

结合 1 个均质土坡算例定量分析降雨过程中边坡的变化, 图 3 是 1 个长 20 m, 高 10 m 的边坡, 地下水位在坡脚以下 5 m 处。假定初始基质吸力呈折线分布: 地下水位以上 0~5 m 范围内, 基质吸力水头从 0 逐渐上升为 5 m(对应基质吸力 50 kPa), 再向上基质吸力保持不变, 图中等值线上的数值表示压力水头(单位: m)。

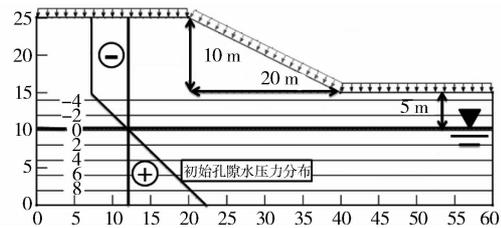


图 3 一个简单边坡

计算时使用的土水特征曲线、渗透性函数见图 1、图 2。强度准则使用 Fredlund 双线性强度准则:  $c' = 20$  kPa,  $\varphi' = 30^\circ$ ,  $\varphi_b = 15^\circ$ 。渗流计算的有限元网格尺度为 1 m 左右。使用 M-P 法搜索圆弧滑裂面计算安全系数。

基本工况: 降雨持续时间 24 h, 1 d 内降雨速率均匀, 为 11.12 mm/h(对应日降雨量 267 mm, 一般而言日降雨量超过 250 mm 时为特大暴雨, 中国沿海地区在台风或其他极端天气下很可能出现这样的天气), 第 24~72 h 无降雨。模型上表面设置流量边界条件, 在计算的时间内, 左右两侧及底部的渗流对滑裂面处的水分分布影响很小, 为简化计算定义为不透水边界。

#### 2.1 降雨过程中孔隙水压和安全系数的变化

图 4、5、6 展示了降雨过程中 3 个时刻( $t = 2.45$ 、9.80 和 24 h)坡内孔隙水压的分布以及 M-P 法搜索的圆弧滑裂面位置, 图中等值线上的数字为压力水头(单位: m)。

如图 4 所示, 降雨 2.45 h 时坡脚平面以上土的压力水头约为 -4 m, 基质吸力约为 40 kPa, 含水率低,  $\theta_w \approx 0.07$ , 此时最可能滑裂面相对较深, 安全系数较大,  $F_s = 2.237$ 。

在降雨的第 9.8 h(图 5), 雨水已经入渗一段时间, 浅层土的含水率与之前相比已经略有增大, 表层基质吸力水头减少到 -2 m 左右,  $\theta_w \approx 0.1$ 。浅层土体的强度也随之降低, 最可能滑裂面上移, 边坡安全系数也减小至  $F_s = 2.142$ 。从这一时刻到第 24 h

(图6),表层土含水率继续上升,雨水也继续下渗,则坡面以下较深处的土体强度也下降,滑裂面逐渐向深处发展。

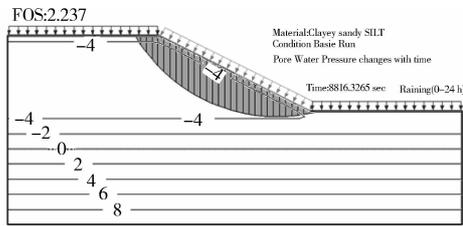


图4  $t=8816\text{ s}(2.45\text{ h})$ 时的孔隙水压分布

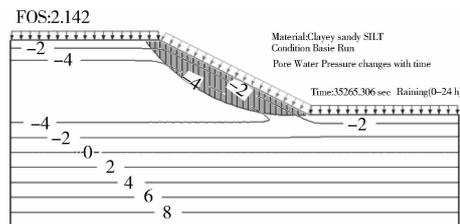


图5  $t=35265\text{ s}(9.80\text{ h})$ 时的孔隙水压分布

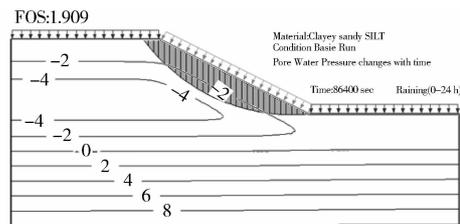


图6  $t=86400\text{ s}(24.00\text{ h})$ 时的孔隙水压分布

所以,在计算的时间范围内,安全系数最小的滑裂面经历了先上移再下移的变化过程,不过安全系数是持续下降的,如图7中粗实线所示。

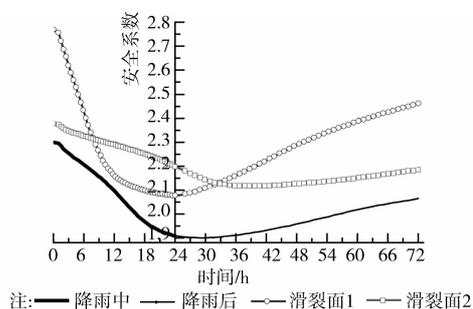


图7 雨中及雨后边坡及特定滑裂面安全系数随时间的变化

## 2.2 降雨停止后的孔隙水压和安全系数变化

降雨持续24 h后停止,雨停后土坡表面没有了持续的水分供给,上层的孔隙水会在重力作用下向下渗,这使坡体内部、地表下深处的土含水率增加,坡面附近的土含水率减小,基质吸力增大。图8、9分别展示了 $t=32.82$ 、 $45.55\text{ h}$ 时的基质吸力分布,

从中可以明显看到上述趋势,比如压力水头等值线“—4”包含的低含水量区萎缩了,与此同时坡面附近基质吸力略有增加。

图7中的细实线表示24~72 h中边坡安全系数的变化:开始时安全系数略有下降,一段时间后回升并趋于定值。下降段在图上不明显,却值得注意,真实存在: $t=24\text{ h}$ 时安全系数为1.909,而 $t=29\text{ h}$ 时安全系数达到全过程中的最小值1.901。也就是说降雨停止后的5 h内安全系数仍在继续降低,这是由于雨水继续入渗导致的。其他算例表明,若减小土的渗透系数或增大边坡尺寸,这一现象会更明显<sup>[9]</sup>。

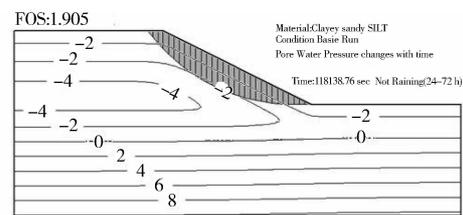


图8  $t=118139\text{ s}(32.82\text{ h})$ 时的孔隙水压分布

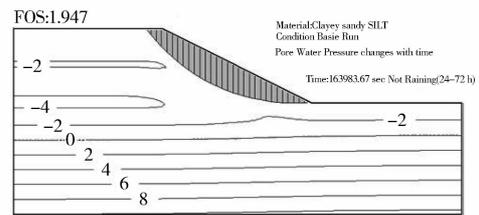


图9  $t=163984\text{ s}(45.55\text{ h})$ 时的孔隙水压分布

## 3 影响规律研究

### 3.1 不同深度的滑裂面,受降雨影响程度不同

在极限平衡法计算安全系数时,可以假设无数个滑裂面(圆弧的或者任意形状的),在一定限制条件下可以找到安全系数最小的滑裂面。由于土体的性质随时间改变,每个滑裂面的安全系数都在随时间变化。含水率的增大导致土体抗剪强度减小——对较深的滑裂面,若降雨尚未渗到滑裂面所处深度,其安全系数随降雨持时的变化不大;而对较浅的滑裂面,雨水很快可以渗入它通过的区域,其安全系数在降雨开始后很快就降低。这里所说的“深”和“浅”并非几何概念,而是与受降雨影响的程度有关。边坡土体不透水的情况下,即便降雨持续很久,坡面以下几十 cm 处含水率依旧保持不变;如果边坡渗透系数较大,坡内孔隙水压对降雨的响应就较快。

在上节算例中取2个深浅不同的折线形滑裂面,如图10所示。滑裂面1较浅,2较深,用M-P法计算它们不同时刻的安全系数,计算结果见图7。

易见其变化趋势有显著差异,滑裂面 1 的安全系数在降雨过程中持续降低并趋于一个定值,雨停后立刻回升。滑裂面 2 安全系数在降雨过程中缓慢降低,雨停之后 12 h 内仍在下降。若把所有可能的滑裂面的安全系数-时间曲线画在图中,其下包络线即为边坡的安全系数-时间曲线。

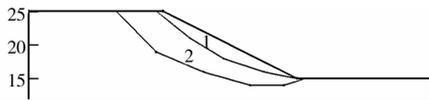


图 10 两个深浅不同的滑裂面

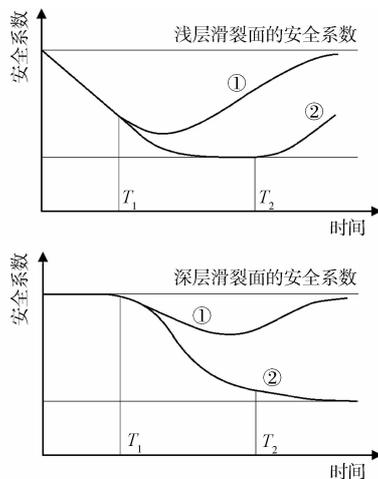


图 11 浅层滑裂面(上)和深层滑裂面(下)的安全系数在降雨和雨后的变化趋势示意图,其曲线①表示  $T_1$  时刻降雨停止,曲线②表示  $T_2$  时刻降雨停止

通过一些计算,可以总结出深层滑裂面和浅层滑裂面的安全系数变化规律。图 11 是两类滑裂面安全系数随时间变化的示意图。降雨开始后浅层滑裂面安全系数逐渐减小,如果降雨时间较短、降雨量小,则雨水可以很快下渗,土坡的安全系数在雨停后即可回升;如果降雨时间较长,安全系数在降雨过程中会趋于一个下限值,雨停后安全系数回升。深层滑裂面在降雨初期不会受影响,如果降雨时间较短,雨停之前该处土体还不受影响,水在雨停后继续下渗,安全系数才逐渐减小、继而回升;如果降雨时间较长,安全系数在雨停之前就开始减小。

### 3.2 降雨持续时间的影响

降雨的强度和持续时间对边坡稳定性的变化趋势也有较大的影响。如果降雨速率不变,持续时间延长,则较长时间后边坡内的渗流会趋于稳态,安全系数也达到一个固定值:新的算例如图 12 所示,降雨时间由基本工况下的 1 d 延长为 3 d,降雨速率不变,2 d 后安全系数趋近于 1.78,并保持恒定,这是 11.12 mm/h 的降雨速率下本算例边坡可能达到的

最低安全系数。第 72 h 降雨停止后安全系数立刻反弹,不再有所下降段。通过该算例和其他相关算例的计算,我们发现,在特定降雨强度下,可找到一个与之对应的临界持续时间,在此临界时间之前安全系数几乎呈线性变化,该时间点以后如果降雨速率不变,则安全系数不再继续减小。

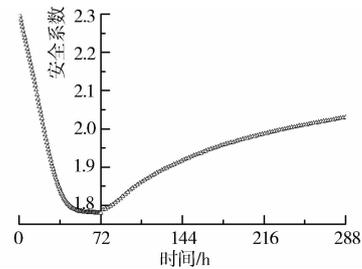


图 12 降雨强度不变(11.12 mm/h),持续时间 72 h 情况下安全系数随时间的变化

### 3.3 降雨强度的影响

如果在基本工况中令降雨强度减小,持续时间不变,仍为 24 h,则安全系数下降速率更慢,降雨停止后达到最小安全系数状态所需的时间也越长。图 13 所示的算例中,降雨强度减小为 4.17 mm/h (100 mm/d),雨停后经过 12 小时安全系数才到达最低点。可见在进行降雨影响分析时不能忽略雨停后坡内水渗流导致的安全系数降低。

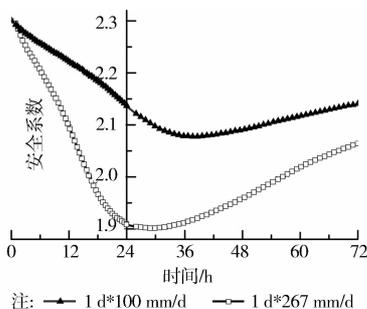


图 13 相同降雨持时(24 h),不同降雨强度下(100 mm/d 和 267 mm/d),降雨前后边坡的安全系数随时间的变化

## 4 结论

研究了降雨对均质非饱和土边坡稳定的影响的相关理论和计算方法,结合算例计算了不同工况下降雨过程中及降雨结束后边坡稳定性变化,可以得到以下结论:

- 1) 降雨强度和持续时间对边坡安全系数有显著影响。若降雨速率不变、降雨时间足够长,安全系数会在一段时间内持续下降,其后趋于恒定。
- 2) 安全系数不一定在雨停的时刻达到最低点。

雨停后随着雨水继续下渗,边坡安全系数还有可能在数小时至数天内继续减小,正因如此,很多滑坡灾害发生在雨后。

3)浅层滑裂面对降雨的响应较快,其安全系数在降雨开始后很快开始下降,降雨结束后也很快开始回升;深层滑裂面的安全系数在更长时间后才会对降雨情况的变化有所响应。

#### 参考文献:

- [1] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soil [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [2] Moriwaki H, Inokuchi T, Hattanji T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. Landslides, 2004, 1(4): 277-288.
- [3] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(1): 198-204.  
Lin H Z, Yu Y Z, Li G X, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204.
- [4] 张建民,王睿,张嘎. 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2010(10): 1582-1587.  
Zhang J M, Wang R, Zhang G. Centrifuge modeling of rainfall-induced deformation of slopes with weak layers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010 (10): 1582-1587.
- [5] Ling H, Ling H I. Centrifuge Model Simulations of Rainfall-Induced Slope Instability [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(9): 1151-1157.
- [6] 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 (Part 2): 105-113.
- [7] Tsaparas I, Rahardjo H, Toll D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 1-27.
- [8] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides [J]. Computers & Structures, 2011, 89(11/12): 893-900.
- [9] 孔郁斐. 降雨对非饱和土边坡稳定性影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [10] 于玉贞,林鸿州,李荣建,等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学,2008, 29(11): 2892-2898.  
Yu Y Z, Lin H Z, Li R J, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2892-2898.
- [11] 宋二祥. 土工结构完全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报,1997, 19(2): 1-7.  
Song E X. Finite Element Analysis of safety factor for soil structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1-7.
- [12] Zhao H, Song E X. A method for predicting co-seismic displacements of slopes for landslide hazard zonation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 40: 62-77.
- [13] Nuth M, Laloui L. Effective stress concept in unsaturated soils; Clarification and validation of a unified framework [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(7): 771-801.
- [14] 汤明高,许强,黄润秋,等. 滑坡体基质吸力的观测试验及变化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006, 25(2): 355-362.  
Tang M G, Xu Q, Huang R Q, et al. Experiment and analysis of suction of unsaturated soil in slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 355-362.
- [15] 吴俊杰,王成华,李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学,2004, 25(5): 732-736, 744.  
Wu J J, Wang C H, Li G X. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 732-736, 744.

(编辑 胡玲)