

## 基于简化 Bishop 积分法降雨滑坡失效概率模型研究

蔡征龙<sup>1,2</sup>, 徐卫亚<sup>1,2</sup>, 石崇<sup>1,2</sup>, 王如宾<sup>1,2</sup>, 闫龙<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为研究降雨对降雨型滑坡的影响,利用不同降雨重现期的前期有效降雨量,分析不同降雨入渗条件下的滑坡土体含水率变化对土体抗剪强度参数和基质吸力的影响;基于简化 Bishop 积分法和响应面法的基本原理,用积分法代替有限条分求和,考虑土体强度参数的变异性及降雨自身随机性,提出一种新的降雨滑坡失效概率模型,定量评价不同降雨条件下的滑坡失效概率,并采用该方法对某一实际滑坡研究分析。结果表明:随着降雨重现期与降雨天数的增加,滑坡的失效概率升高;但考虑降雨自身的概率时,滑坡的失效概率并非随降雨重现期的增加而增加,且考虑基质吸力所得的稳定系数略高,失效概率稍低。

**关键词:**降雨型滑坡;前期降雨量; Bishop 积分法;响应面;失效概率

中图分类号:TV223

文献标志码:A

### Study on the Failure Probability Model of Landslide with Rainfall Infiltration Based on Simplified Bishop Integral Method

CAI Zhenglong<sup>1,2</sup>, XU Weiya<sup>1,2</sup>, SHI Chong<sup>1,2</sup>, WANG Rubin<sup>1,2</sup>, YAN Long<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab. of Ministry of Education for Geomechanics & Embankment Eng., Hohai Univ., Nanjing 210098, China;  
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Eng. Technol., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between landslides and rainfall, the antecedent effective precipitations of different return periods were used to analyze the influence of soil moisture on the shear strength parameters of soil body and matrix suction. Then a new method was presented to quantitatively evaluate landslide failure probability under different rainfall return periods based on response surface and simplified Bishop integral method. In additional, the method was applied to an example and the result showed that the failure probability of landslide increases with the increase of rainfall return period and rainy days. But considering the probability of rainfall itself, a growing rainfall return period does not mean the increase in failure probability of landslide. A slightly stability factor and a lower failure probability of landslide can be calculated based on matrix suction.

**Key words:** rainfall-induced landslide; antecedent precipitation; Bishop integral method; response surface; probability analysis

近年来,随着中国基础建设步伐的加快及自然因素的影响,出现大量地质灾害和环境问题,而滑坡作为最主要的地质灾害之一,严重威胁着人类的生命财产安全<sup>[1-3]</sup>。降雨作为诱发滑坡灾害的主要因素之一引起人们的普遍关注,为研究降雨型滑坡的失效概率,除考虑降雨自身发生的概率外,还必须考虑降雨入渗对滑坡体力学参数(土抗剪强度参数、滑体重度等)的影响<sup>[4]</sup>。

目前,针对降雨条件下的边坡稳定性分析,主要采用极限平衡法评价边坡的稳定性,并与传统的条分法相结合,即主要通过土条间的静力平衡判断整体的稳定性,计算的结果也往往过于依赖所选土条的宽度<sup>[5-6]</sup>。积分法能有效地避免条分求和法的缺陷,提高稳定系数的计算精度。其中,张天宝<sup>[7]</sup>对瑞典法安全系数的积分表达式进行推导;戴自航等<sup>[8]</sup>根据简化 Bishop 条分法的基本原理给出了完整

收稿日期:2015-08-15

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAB06B01);国家自然科学基金青年基金资助项目(51309089)

作者简介:蔡征龙(1988—),男,博士生。研究方向:岩石高边坡。E-mail:252498497@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

的积分解析式。然而,此种稳定系数计算方法并未考虑计算参数自身的随机性,因此并不能准确判断滑坡的安全程度。

将降雨的随机性引入滑坡稳定性分析中,充分考虑降雨与土体抗剪强度参数自身的随机性及两者间的关系<sup>[9]</sup>,将简化 Bishop 积分法和响应面法相结合建立降雨滑坡失效概率模型,并针对云南某一降雨型滑坡进行稳定分析。

## 1 前期有效降雨量

降雨对滑坡失稳有着重大影响。目前,国内对降雨与滑坡的影响研究,主要基于某一地区大量的滑坡统计资料和降雨资料,从降雨雨型、连续降雨

量、降雨历时、最大降雨强度等几个方面进行具体分析<sup>[10-11]</sup>。针对降雨型滑坡,主要考虑前期有效降雨对滑坡失稳的影响,即在经过地表径流、蒸发等过程的损失后渗入滑坡土体的降雨。采用文献<sup>[12]</sup>的方法计算前期有效降雨量,其具体公式为:

$$R_e = \sum_{k=1}^n \left[ 1 - \left( \frac{k}{k-1} \right)^\alpha \right] \cdot \sum_{i=1}^k R_i \quad (1)$$

式中:  $R_e$  为前期有效降雨量;  $\alpha$  为尺度因子;  $R_i$  为第  $i$  天的降雨量,根据有效降雨量与诱发滑坡的关系<sup>[4,13]</sup>对云南省黏土滑坡尺度因子取 0.2,取 15 天前的降雨量较为合理。结合文献<sup>[14]</sup>的实测降雨资料,在本文的工程实例计算中,其不同降雨重现期对应的累计降雨量如表 1 所示。

表 1 不同降雨重现期对应的累计降雨量

Tab. 1 Accumulated rainfall of different rainfall return period

重现期/a	概率	降雨天数/d					
		1	5	10	15	20	30
5	0.20	143.327	224.669	252.431	296.705	333.374	355.413
10	0.10	173.819	273.716	301.827	355.752	391.877	413.366
20	0.05	203.067	320.764	349.209	412.391	447.995	468.955
50	0.02	240.926	381.662	410.541	485.705	520.635	540.910
100	0.01	269.296	427.297	456.500	540.643	575.068	594.830

一般而言,滑坡浅层大多为非饱和黏土,含水率的变化对其力学性质的影响很大。因此,降雨对滑坡的影响区域大多为滑坡浅层<sup>[15]</sup>。据研究表明<sup>[10]</sup>,中国南方多雨地区,降雨对黏土滑坡的影响深度一般在 2 m 左右,根据有效降雨量求得土体饱和度和为:

$$S_T = S_i + \frac{10R_e}{nD} \quad (2)$$

式中,  $S_i$  为初始饱和度,  $D$  为降雨影响深度, m。

假定  $e$  为孔隙比,饱和度  $S_T$  与体积含水率  $\theta$  的相互关系为:

$$S_T = \theta(1 + 1/e) \quad (3)$$

## 2 计算参数的确定

降雨容易引起滑坡表层土体含水率的急剧增加。一方面,非饱和土体抗剪强度与土体含水率紧密相关,其含水率的变化造成孔隙水压力上升,基质吸力随之减小,使其的抗剪强度降低,造成滑坡失稳。另一方面,非饱和土体含水率增加,容重也随之改变,这也是滑坡失稳不可忽视的重要因素。

### 2.1 容重的确定

降雨会引起土的重量增加,其容重可表示为:

$$\gamma = \gamma_d + \theta\gamma_w \quad (4)$$

式中,  $\gamma_d$  为干容重,  $\gamma_w$  为水的重度,  $\theta$  为体积含水率。

### 2.2 非饱和土抗剪强度参数的确定

非饱和土体抗剪强度采用 Fredlund 在 1978 年提出的非饱和土抗剪强度公式<sup>[16]</sup>,将净法向应力和基质吸力作为 2 个独立变化的应力状态参量,具体公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (5)$$

式中,  $u_a$ 、 $u_w$  分别为孔隙气压力和孔隙水压力,  $(u_a - u_w)$  为基质吸力。式(5)中前 2 项为传统的 Mohr-Coulomb 准则;第 3 项为基质吸力所引起的强度,其中,  $\varphi^b$  并非一个常数,而是随体积含水率的变化而变化,与土体特征曲线紧密相关,这里采用 Vana-palli 等<sup>[17]</sup>在 1996 年提出的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi' \quad (6)$$

式中,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别为饱和体积含水率和残余体积含水率。

大量试验研究表明, 含水率的变化直接影响着土体抗剪强度参数黏聚力  $c$  的大小, 随之土体含水率的增加, 黏聚力  $c$  显著减小; 但含水率对摩擦角的影响却并不十分明显。本文采用文献[18]的曲线拟合非饱和黏性土的抗剪强度参数与体积含水率之间的关系:

$$c = 213.0623 \cdot e^{-0.0698 \cdot \theta} \quad (7)$$

$$\varphi = 23.7637 - 0.071 \cdot \theta \quad (8)$$

### 3 模型理论

#### 3.1 非饱和简化 Bishop 的积分表达式

假定某一岩土体边坡如图 1 所示, 以坡趾处为原点建立平面直角坐标系, 滑动面为圆弧滑动, 其滑动圆心为  $O(x_0, y_0)$ , 半径为  $R$ ,  $F(x)$  为边坡边界线,  $G(x)$  为滑动曲面的滑动曲线, 其圆弧方程为:

$$y = y_0 - \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}, 0 \leq x \leq g_1 \quad (9)$$

式中,  $g_1$  为  $F(x)$  与  $G(x)$  圆弧曲线的右交点  $x$  坐标。

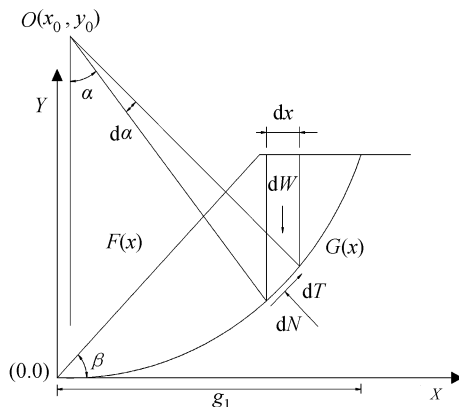


图 1 积分法坐标系

Fig. 1 Coordinate system of internal method

由图 1 可得出下列函数关系:

$$\sin \alpha = \frac{x - x_0}{R} \quad (10)$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}}{R} \quad (11)$$

任取一微分滑动土条, 土条宽度  $dx$ , 土条重量  $dW$ , 且  $dW \approx \gamma(F(x) - G(x))dx$ ,  $dT$  为切向抗剪力,  $dN$  为法向反力,  $X$  为竖向剪力,  $d\alpha$  为  $\alpha$  角的增量,  $dl$  为微分段的弧长,  $dl = R d\alpha$ 。

根据简化 Bishop 定义, 不考虑微分条间的竖向剪切力  $X$ , 这里  $d\alpha$  为微小增量, 则视  $\alpha + d\alpha \approx \alpha$ , 取微分条垂直方向力的平衡, 则有:

$$dN \cos \alpha + dT \sin \alpha - dW = 0 \quad (12)$$

根据 Vanapalli 的非饱和土的剪切强度理论式, 由于边坡与外界大气相通, 则  $u_a = 0$ 。此时非饱和土的总凝聚力  $c = c' + s \tan \varphi^b$ , 其中  $s$  为基质吸力, 在饱和土中其值为 0。

则可得:

$$dT = \frac{1}{F_s} \left( (c + s \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi) dl + dN \tan \varphi \right) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得:

$$dN = \frac{1}{m_a} (dW - \frac{\tan \alpha}{F_s} (cdx + s \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi dx)) \quad (14)$$

式中,  $m_a = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \varphi}{F_s}$ 。

同理,  $dx$  为微小增量, 视  $x - x_0 + dx \approx x - x_0$ , 根据滑动土体对圆心的整体力矩平衡, 此时相邻微分条之间侧壁的作用力力矩, 因大小相同, 方向相反相互抵消, 而滑面上的法向反力  $dN$  的作用方向通过圆心不产生力矩, 则有:

$$\int_0^{g_1} (x - x_0) dW = \frac{R}{F_s} \int_0^{g_1} (cdl + s \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi dl + dN \tan \varphi) \quad (15)$$

根据式(10)、(14)和(15), 得:

$$F_s = \frac{\int_0^{g_1} \frac{1}{m_a} (dW \tan \varphi + cdx + s \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi dx)}{\int_0^{g_1} \sin \alpha dW} \quad (16)$$

则对应的滑坡稳定功能函数能被得到  $Z = g(X) = F(X_1, X_2, \dots, X_n) - 1$ , 其中  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为边坡稳定分析中的随机变量。

#### 3.2 响应面法的滑坡失效概率计算

在滑坡失效概率的分析过程中, 由于影响滑坡失稳的因素非常复杂, 其功能函数含有随机变量里的隐式函数, 而一般的可靠度方法需对随机变量进行偏导数计算, 这给计算带来很大的难度, 因此这里选择响应面法将功能函数近似表示为随机变量的显示表达式, 再结合 JC 法进行计算。这里采用二次多项式的表达形式:

$$Z' = g'(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (17)$$

式中,  $a, b_i, c_i$  为修正系数。

其基本思想为<sup>[19]</sup>:

1) 设初始迭代点  $X^{(1)} = (X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_n^{(1)})$ ,

$\dots, X_n^{(1)})$ , 初次计算取平均值。

2) 根据简化 Bishop 积分法计算得出功能函数  $Z = g(X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_i^{(1)}, \dots, X_n^{(1)})$  和  $Z = g(X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_i^{(1)}, \pm f\sigma_i, \dots, X_n^{(1)})$ ; 其中,  $f$  在第 1 次估计计算中取 3, 之后的计算中取 1。

3) 求解根据式(17)和步骤2)所得到的线性方程组确定修正系数  $a, b_i$  和  $c_i$  的值。

4) 结合 JC 法求解可靠度指标  $\beta^{(k)}$  和验算点  $X^{*(k)}$ 。

5) 如果  $|\beta^{(k)} - \beta^{(k+1)}| < \varepsilon$  (收敛精度), 则计算停止, 否则通过线性插值得到新的展开点(式(18)), 并返回步骤2)重新进行计算, 直至收敛。

$$X_M^k = X^{(k)} + (X^{*(k)} - X^{(k)}) \frac{g(X^{(k)})}{g(X^{(k)}) - g(X^{*(k)})} \quad (18)$$

### 4 土质滑坡实例

某滑坡位于云南普洱市思茅区云仙乡境内小黑江左岸, 斜坡总体坡向 SW  $\angle 60^\circ$ , 平均坡角  $30^\circ$ 。滑坡平面呈条带状, 滑坡前缘高程 850 m; 后缘以陡缓坡交汇处为界, 高程 1 000 m。滑坡两侧以冲沟为界线, 下游冲沟切割深度约 7 m, 在冲沟中部露头可见浅灰色中厚层-薄层砂岩, 表层强风化, 张节理密集, 滑坡体表面植被发育较差。地形坡度约为  $30^\circ$ , 前部形成滑坡平台, 后部相对较陡。

此滑坡距离小黑江河床 400 m, 横向宽度 100 m, 主滑方向长度 350 m, 滑动面埋深约 10 m, 滑坡面积为  $3.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 估计方量  $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体表面植被发育较差, 地形坡度大约为  $30^\circ$ , 前部形成滑坡平台, 后部相对较陡。由图 2 可知, 滑坡体基岩岩性主要为南段群( $C_3$ )凝灰岩夹硅质岩、砂岩。滑坡体表层为耕植土层, 主要成分为黏土、粉土, 其下为碎块石土层, 块石成分凝灰岩。

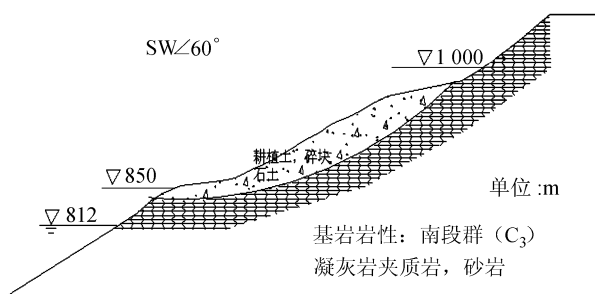


图2 某一滑坡剖面图

Fig.2 One section of a landslide

### 4.1 基质吸力随体积含水率变化特征

为研究基质吸力对滑坡土体强度的影响, 进行土体体积含水率与基质吸力的配比试验。根据室内试验结果可知, 随着土体体积含水率的增加, 基质吸力逐渐降低, 当体积含水率接近饱和状态时, 基质吸力降低到仅 0.2 kPa; 表明滑坡体体积含水率对其强度的影响十分显著。其中, 土的体积含水率  $\theta$  采用经典的 VG (van genuchten) 模型来拟合。van Genuchten 的表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (as)^{\frac{1}{1-m}}]^m} \quad (19)$$

式中:  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别为饱和体积含水率和残余体积含水率;  $s$  为基质吸力;  $a, m$  为拟合参数, 具体拟合参数见表 2, 相应的土-水特征曲线如图 3 所示。

表 2 土-水特征曲线拟合参数

Tab.2 Parameters of soil-water characteristic curves

$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	$a$	$m$
59.187 9	10	0.101 7	0.348 2

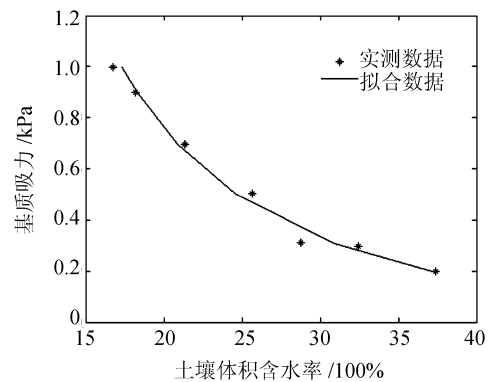


图3 基质吸力与体积含水率关系

Fig.3 Relation between matrix suction and moisture content

### 4.2 降雨诱发滑坡的失效概率

在降雨诱发滑坡失效概率分析中<sup>[14]</sup>, 假定降雨为  $A$  事件, 其概率为  $P(A)$ ; 滑坡失稳为  $B$  事件, 其概率为  $P(B)$ ; 降雨条件下滑坡失效概率为  $P(B|A)$ , 则降雨诱发滑坡失效的概率  $P(AB) = P(A)P(B|A)$ 。

试验测得土体参数孔隙比为 0.77, 天然重度为  $18.6 \text{ kN/m}^3$ , 并利用不同降雨重现期不同天数的前期有效降雨量, 根据第 2.2 节计算出不同降雨量条件下的滑坡土体抗剪强度参数黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\sigma$ , 其标准差分别设为 2 kPa 和  $1.5^\circ$ , 并将  $c$  和  $\sigma$  作为 2 个正态分布的独立随机变量, 通过第 3 节的滑坡失效概率模型计算出滑坡的失效概率  $P(B|A)$ 。

降雨前的前缘局部滑动带的滑动面由现场地质勘测分析确定;降雨后的最优滑动面通过网格搜索法<sup>[5]</sup>求出,对应于 100 年一遇 30 d 降雨的滑动面如图 4 所示,可以看出,滑坡最有可能在坡顶角发生浅层滑动,其滑动面在降雨的主要影响范围内。

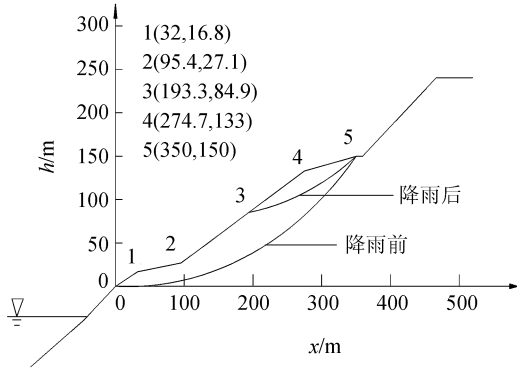


图 4 某一滑坡计算剖面示意图

Fig. 4 Calculation section of a landslide

利用本文模型对此土质滑坡实例进行具体分析,其不同降雨重现期降雨的滑坡稳定系数与失效概率  $P(B|A)$ 、 $P(AB)$  如图 5 ~ 7 所示。

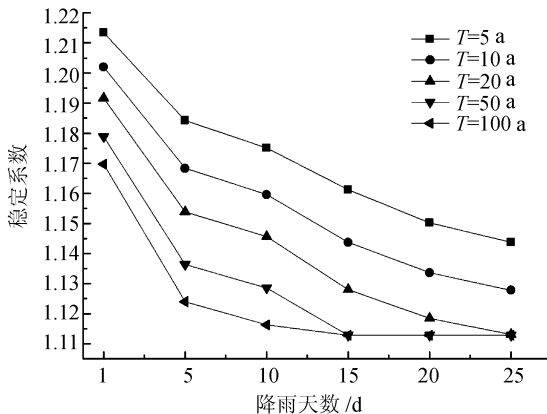


图 5 不同降雨重现期下滑坡稳定系数

Fig. 5 Slope safety factor for different return periods

结果表明,随着降雨重现期与降雨天数的增加,滑坡的稳定系数逐渐减小,失效概率  $P(B|A)$  随之增大。

此外,从图 5 ~ 6 中可以看出,在 50 年一遇 15 d 前期降雨量时,滑坡的稳定系数和失效概率  $P(B|A)$ 、 $P(AB)$  趋于稳定,不再随着降雨重现期和降雨天数的增加而变化,这表明滑坡表面已基本达到饱和,其抗剪强度已降到最低值。

由图 7 可知,在降雨天数相同的情况下,滑坡失效概率  $P(AB)$  并不是随降雨重现期的增加而增大,如 100 年一遇 30 d 前期降雨量条件下,滑坡的稳定系数降为 1.11,失效概率  $P(B|A)$  达到 9.55%。但由于降雨重现期为 100 a 的自身发生的概率  $P(A)$

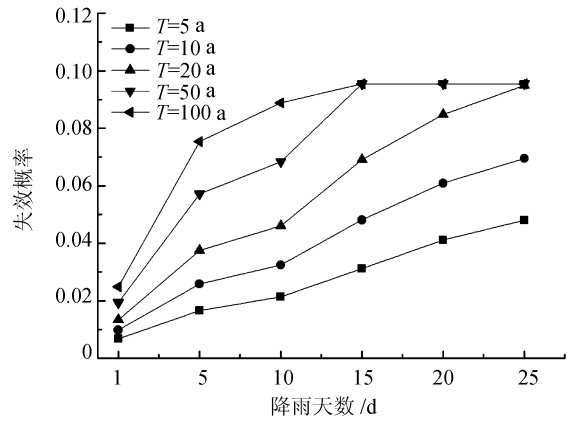


图 6 不考虑降雨概率的不同降雨重现期滑坡失效概率  $P(B|A)$

Fig. 6 Probability of landslide failure  $P(B|A)$  for different return periods

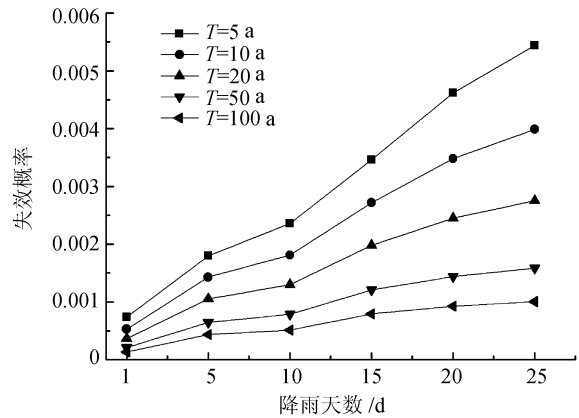


图 7 考虑降雨概率的不同降雨重现期滑坡失效概率  $P(AB)$

Fig. 7 Probability of landslide failure  $P(AB)$  for different return periods

仅为 0.01,其滑坡失效  $P(AB)$  发生的概率反而最小,仅为 0.095 5%。表 3 显示不同重现期的前 15 d 降雨条件下滑坡失效概率值。可以看出,考虑基质吸力时,滑坡的稳定系数与可靠度指标略高,失效概率略低,且随着重现期的增加,土体趋向饱和,这种影响也随着基质吸力的减小而减小。

### 5 结 论

1) 根据有效降雨量得出滑坡土体的体积含水率,并定量计算出降雨入渗条件下的滑坡土体强度参数和非饱和土体的基质吸力,为滑坡的稳定性分析提供基础。

2) 结合响应面法和简化 Bishop 积分法对滑坡的稳定性进行分析,可准确判断滑坡的失效概率,为工程设计和防震减灾提供参考。

表3 不同降雨重现期前15 d降雨量的滑坡失稳概率

Tab.3 Probability of landslide failure for 15 d cumulative rainfall in different return periods

降雨重现期/a	$P(A)$	稳定系数		可靠度指标		$P(B A)/10^{-2}$		$P(AB)/10^{-4}$	
		考虑 $s$	不考虑 $s$	考虑 $s$	不考虑 $s$	考虑 $s$	不考虑 $s$	考虑 $s$	不考虑 $s$
5	0.20	1.167 2	1.161 2	1.936 1	1.864 4	2.64	3.11	5.28	6.220
10	0.10	1.149 1	1.143 7	1.726 4	1.663 7	4.21	4.81	4.21	4.810
20	0.05	1.132 7	1.128 0	1.537 8	1.482 7	6.20	6.91	3.10	3.455
50	0.02	1.116 7	1.112 8	1.353 7	1.307 9	8.79	9.55	17.58	19.100
100	0.01	1.116 7	1.112 8	1.345 7	1.307 9	8.92	9.55	8.92	9.550

注:  $s$  为基质吸力,  $P(A)$  为降雨的概率,  $P(B|A)$  为降雨条件下的滑坡失稳概率,  $P(AB)$  为不同重现期的滑坡失稳概率。

3) 计算实例表明,随着降雨重现期与降雨天数的增加,滑坡的失效概率升高,但考虑降雨自身发生的概率时,滑坡的失效概率并非随降雨重现期的增加而增加,且考虑基质吸力所得的稳定系数略高,失效概率稍低。

#### 参考文献:

- [1] Luo Yu, He Siming, Li Xinpo, et al. Study on the motion characteristics of rainfall-induced landslide with arc sliding surface[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(5): 73 - 77. [罗渝, 何思明, 李新坡, 等. 圆弧面上的降雨滑坡运动特性研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47(5): 73 - 77.]
- [2] Zhao Minghua, Liu Jianhua, Chen Bingchu, et al. Variable weight combination forecasting model of slope deformation and instability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp 1): 553 - 557. [赵明华, 刘建华, 陈炳初, 等. 边坡变形及失稳的变权重组合预测模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 553 - 557.]
- [3] Cui Yulong, Wei Jinbing, Deng Jianhui, et al. Development law of landslides in the either bank of the channel reservoir with the analysis of contribution rate[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(3): 50 - 56. [崔玉龙, 魏进兵, 邓建辉, 等. 利用贡献率分析法研究河道型水库两岸滑坡发育规律[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(3): 50 - 56.]
- [4] Tang Dong, Li Dianqing, Zhou Chuangbing, et al. Slope stability analysis considering antecedent rainfall process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3239 - 3247. [唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239 - 3247.]
- [5] Cai Zhenglong, Meng Yongdong, Su Qingming, et al. Analytical calculation of soil slope stability based on Matlab[J]. Journal of China Three Gorges University, 2014, 36(5): 60 - 63. [蔡征龙, 孟永东, 苏清明, 等. 基于 Matlab 的土坡稳定分析的解析计算[J]. 三峡大学学报, 2014, 36(5): 60 - 63.]
- [6] Wu Fengyuan, Fan Yunyun, Liang Li, et al. Simulation analysis of landslide motion process based on the dynamic slice method[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(Supp 1): 7 - 12 [吴凤元, 樊赟赟, 梁力, 等. 基于动力条分法的滑坡运动过程模拟分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(增刊1): 7 - 12.]
- [7] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [8] Dai Zihang, Shen Pusheng. Numerical solution of simplified Bishop method for stability analysis of soil slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 760 - 764. [戴自航, 沈蒲生. 土坡稳定分析简化 Bishop 法的数值解[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 760 - 764.]
- [9] Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Chen Qinglai, et al. Monte-Carlo reliability analysis of landslide based on numerical solution of Sweden slice method[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007(4): 18 - 21. [郭长宝, 张永双, 陈情来, 等. 基于瑞典条分法数值解的边坡蒙特卡罗可靠性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007(4): 18 - 21.]
- [10] Wang Ruigang, Yan Shuwang, Deng Weidong, et al. Reliability analysis of highway subgrade stability based on

- mean rainfall amount[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1733 - 1738. [王瑞钢, 闫澍旺, 邓卫东, 等. 基于平均降雨量的路堤稳定可靠性分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11): 1733 - 1738. ]
- [11] Li Changjiang, Ma Tuhua, Sun Leling, et al. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(1): 81 - 86. [李长江, 麻土华, 孙乐玲, 等. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法[J]. *山地学报*, 2011, 29(1): 81 - 86. ]
- [12] Ma Tuhua, Li Changjiang, Lu Zhiming, et al. Effective antecedent precipitation model derived from the power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level[J]. *Geomorphology*, 2014, 216(2): 187 - 192.
- [13] Cui Peng, Yang Kun, Chen Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia gully as an example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1): 11 - 15. [崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11 - 15. ]
- [14] Chen Lixia, Yin Kunlong, Liu Changchun. Return period statistics of extreme rainfall and application to landslide probability analysis[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(5): 745 - 750. [陈丽霞, 殷坤龙, 刘长春. 降雨重现期及其用于滑坡概率分析的探讨[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(5): 745 - 750. ]
- [15] Wei Ning, Qian Pingyi, Fu Xudong. Effects of rainfall infiltration and evaporation on soil slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 778 - 786. [魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. *岩土力学*, 2006, 27(5): 778 - 786. ]
- [16] Fredlund D G, Rahardio H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [17] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect of soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 379 - 392.
- [18] Wang Jianhua, Huang Nuan. Reliability analysis of stability for unsaturated loess slopes under the condition of rainfall infiltration[J]. *Water Power*, 2006, 32(10): 38 - 40. [王建华, 黄暖. 降雨入渗条件下非饱和黄土边坡稳定的可靠度分析[J]. *水力发电*, 2006, 32(10): 38 - 40. ]
- [19] Wang Yongfei, Wang Chengguo. The application of response surface methodology[J]. *Journal of the CUN: Natural Sciences Edition*, 2005, 14(3): 236 - 240. [王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. *中央民族大学学报: 自然科学版*, 2005, 14(3): 236 - 240. ]

(编辑 李轶楠)