

DOI: 10.11779/CJGE201706012

强降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的基岩型层状边坡可靠度分析

覃小华^{1, 2}, 刘东升³, 宋强辉^{1, 2}, 吴 越³, 张 裕^{1, 2}, 叶 泳⁴

(1. 后勤工程学院军事土木工程系, 重庆 401311; 2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室(后勤工程学院), 重庆 401311;
3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401391; 4. 61243 部队, 新疆 830000)

摘要: 边坡土体因其自身的不均匀性及试验监测的不准确性, 饱和渗透系数表现出一定的变异性。为探索强降雨条件下基岩型层状边坡的稳定性及失稳破坏概率, 以笔者前期对基岩型层状边坡降雨入渗及其稳定性模型的研究为基础, 结合 Monte Carlo 法, 建立了考虑饱和渗透系数变异性的基岩型层状边坡稳定性可靠度计算模型, 并基于 MATLAB 将这一计算过程程序化。最后, 利用建立的基岩型层状边坡可靠度计算模型, 得到了张家湾滑坡在不同饱和渗透系数变异系数及降雨强度下的失稳破坏概率, 分析了饱和渗透系数变异系数及降雨强度对滑坡失稳破坏概率及安全系数均值的影响。计算结果表明在一定降雨条件下, 当失稳破坏概率小于 50%时, 变异系数越大、滑坡发生失稳破坏的概率越大; 当失稳破坏概率大于 50%时, 变异系数越小、滑坡发生失稳破坏的概率越大。

关键词: 强降雨; 基岩型层状边坡; 可靠度分析; 饱和渗透系数; 失稳概率

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)06-1065-09

作者简介: 覃小华(1988-), 男, 重庆垫江人, 博士研究生, 主要从事非饱和土及边坡工程稳定性分析方面的研究。
E-mail: 673124692@qq.com。

Reliability analysis of bedrock laminar slope stability considering variability of saturated hydraulic conductivity of soil under heavy rainfall

QIN Xiao-hua^{1, 2}, LIU Dong-sheng³, SONG Qiang-hui^{1, 2}, WU Yue³, ZHANG Yu^{1, 2}, YE Yong⁴

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, Chongqing 401311, China; 3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401391, China; 4. 61243 Troop, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The saturated permeability coefficient of soil is an inherent variable due to its inhomogeneity and the inaccuracy of monitoring. To explore the stability and failure probability of bedrock laminar slope under heavy rainfall, a reliability analysis model of bedrock laminar slope is founded based on the Monte Carlo method and the model for rainfall infiltration and stability analysis developed by the authors, and the variability of saturated permeability coefficient of slope soil is considered in this reliability analysis model. To calculate the failure probability, the whole process is realized based on MATLAB. At the same time, the failure probability of Zhangjiawan landslide under different variation coefficients of saturated permeability coefficient and different rainfall intensities is analyzed by using the reliability analysis model, and the influences of variation coefficient of saturated permeability coefficient and rainfall intensity on failure probability and safety factor are analyzed. The results show that the larger the variation coefficient, the greater the failure probability of Zhangjiawan landslide when the failure probability is less than 50%. However, the smaller the variation coefficient, the greater the failure probability of Zhangjiawan landslide when the failure probability is greater than 50%.

Key words: heavy rainfall; bedrock laminar slope; reliability analysis; saturated permeability coefficient; failure probability

0 引言

边坡发生失稳破坏是一个复杂的地质运动过程, 不同边坡其内部结构和组成不一, 发生失稳破坏的模式也有所不同^[1]。基岩型层状边坡是一种典型浅层边

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408603, 51308576); 重庆市基础与前沿研究一般项目(cstc2013jcyjA00010, cstc2014jcyjA30014, cst2015jcyjA00003); 重庆市研究生科研创新项目(CYB14103)
收稿日期: 2016-10-21

坡，上部为一定厚度的土壤层、下部为不透水的基岩层，其坡体组成与失稳破坏模式均有别于一般边坡。因此，有必要对基岩型层状边坡在强降雨作用下的入渗模型、稳定性及可靠度评价模型单独进行分析与研究。

近年来，国内外许多学者围绕降雨入渗模型及诱发滑坡的致灾机理等领域做了大量的研究工作。业内对土体入渗的模型研究较多，Green-Ampt 入渗模型^[2]因其概念明确、解析计算方便而被广泛应用。Chen 等^[3]基于 Green-Ampt 入渗模型研究了边坡的降雨入渗，得到了边坡表面入渗率的表达式。文献[4~8]基于 Green-Ampt 模型，分析了无限浅层滑坡的稳定性，揭示了降雨诱发滑坡的破坏机理，对降雨诱发滑坡的预报和防治提供了重要的理论基础。文献[9]考虑了基岩型层状边坡的几何特征及饱和带渗流作用，对基岩型层状边坡的降雨入渗与稳定性分析模型进行了推导，并应用于张家湾滑坡的降雨入渗与稳定性分析中。但上述研究均是基于确定性分析方法，未能考虑边坡土体物理力学参数的变异性。事实上，由于边坡土体物理组成、应力历史、地质作用及空间分布的差异性，其物理力学参数表现出不同程度的变异性。基于边坡稳定性概率分析方法（一阶可靠度法^[10]、蒙特卡罗法^[11]及随机有限元法^[12~13]），反映土体物理力学性质的黏聚力、内摩擦角、重度及饱和渗透系数等参数的变异性对边坡破坏概率的影响已作了一定的探讨^[14~16]。

本文基于文献[9]对基岩型层状边坡降雨入渗与稳定性的研究成果，利用基岩型层状边坡在强降雨条件下的入渗模型和稳定性分析模型，考虑边坡土体饱和渗透系数的变异性，分析饱和渗透系数变异性及降雨强度对基岩型层状边坡失稳破坏概率及安全系数的影响。

1 基岩型层状边坡降雨入渗及稳定性分析模型

强降雨作用下，基岩型层状边坡降雨入渗与稳定性分析模型是分析其稳定性可靠度面临的首要问题。因此，在分析强降雨条件下基岩型层状边坡稳定性可靠度时以笔者^[9]建立的降雨入渗及稳定性分析模型为基础，对其在考虑饱和渗透系数变异性下的降雨入渗及稳定性模型进行研究。其中，基岩型层状边坡的降雨入渗示意图，如图 1 所示。

1.1 基本假定

在分析强降雨条件下基岩型层状边坡的降雨入渗及其稳定性模型前，作如下基本假定：①边坡土体为均匀刚性体，且为各向同性材料，可将整个滑体视为

一个整体进行研究；②边坡体内部无地下水作用，降雨前，坡体含水率为一定值，且湿润峰处的基质吸力也为一定值；③降雨过程中，边坡表面无积水，且降雨强度大于土体的饱和渗透系数；④边坡在降雨过程中的潜在滑动面为基岩与土壤的接触面和湿润峰所在面。

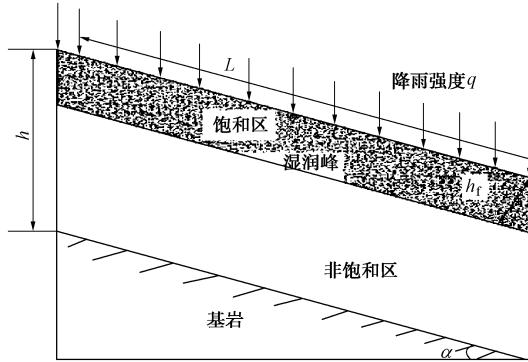


图 1 边坡降雨入渗示意图

Fig. 1 Sketch of rainfall infiltration of slope

1.2 降雨入渗模型

根据笔者等^[9]分析，强降雨条件下，基岩型层状边坡在无压入渗、有压入渗和稳定入渗阶段的湿润峰深度 h_f 随降雨历时 t 的计算式分别为

$$h_f = \frac{q \cos \alpha}{\Delta \theta} t \quad (t \leq t_0) \quad , \quad (1)$$

$$\frac{k_s}{\Delta \theta L} (t - t_0) = \left(m - \frac{1}{2} \right) \ln \left(\frac{nh_f + w - p}{nh_0 + w - p} \right) - \left(m + \frac{1}{2} \right) \ln \left(\frac{nh_f + w + p}{nh_0 + w + p} \right) \quad (t_0 < t < t_w) \quad , \quad (2)$$

$$h_{\max} = \frac{L \cos \alpha + \sqrt{L^2 \cos^2 \alpha + 4h_s L}}{2} \quad (t \geq t_w) \quad . \quad (3)$$

式中 q 为降雨强度； α 为边坡体表面的倾角； L 为边坡长度； k_s 为土体的饱和渗透系数； $\Delta \theta = (\theta_s - \theta_0)$ 为土体的含水率差值； h_s 为湿润峰处的基质吸力水头（为便于计算，本文将 h_s 假定为常数）； t_w 为边坡由有压入渗进入稳定入渗的临界点； h_{\max} 为边坡达到稳定入渗后湿润峰深度的最大值；参数 m ， n ， w ， p 的表达式分别为

$$m = \frac{L \cos \alpha \sqrt{L^2 \cos^2 \alpha + 4Lh_s}}{2L^2 \cos^2 \alpha + 8h_s L} \quad ,$$

$$n = 2\sqrt{L^2 \cos^2 \alpha + 4Lh_s} \quad , \quad (4)$$

$$w = 4Lh_s + L^2 \cos^2 \alpha \quad ,$$

$$p = L \cos \alpha \sqrt{L^2 \cos^2 \alpha + 4Lh_s} \quad ,$$

其中， h_0 ， t_0 为分别为边坡由无压入渗进入有压入渗的湿润峰深度和降雨历时，其计算式分别为

$$h_0 = \frac{k_s h_s}{(q - k_s) \cos \alpha} \quad , \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{I_0}{i} = \frac{(\theta_s - \theta_0)h_0}{q \cos \alpha} = \frac{\Delta \theta k_s h_s}{(q - k_s)q \cos^2 \alpha} \quad \text{。} \quad (6)$$

1.3 考虑饱和渗透系数变异性的入渗

从以上分析可知, 当饱和渗透系数 k_s 为定值时, 通过式 (5) 和式 (6) 预先计算 h_0 , t_0 后, 便可知任意 t 时刻的入渗阶段, 从而选择不同的计算公式来计算湿润峰深度 h_f 。然而, 由于边坡土体分布的不均匀性及室内测试的不准确性, 得到的饱和渗透系数也必然具有一定的变异性; 因此, 在边坡降雨入渗分析过程中, 将饱和渗透系数视为一随机变量, 考虑其变异性对边坡稳定性的影响更符合实际情况。

当饱和渗透系数 k_s 为一随机变量时, 由等式 (6) 可知, 在任意降雨时刻 t , 必然存在某一对应的临界饱和渗透系数, 使边坡降雨入渗处于无压入渗和有压入渗的临界状态, 将此临界饱和渗透系数记为 $k_s(st)$:

$$k_s(st) = \frac{tq^2 \cos \alpha}{tq \cos^2 \alpha + \Delta \theta h_s} \quad \text{。} \quad (7)$$

综上分析, 当随机变量 $k_s(i) \geq k_s(st)$ 时, 将 $k_s(i)$ 代入等式 (6) 中计算得到的降雨历时 $t_0(i)$, 且必然有 $t_0(i) > t$; 因此, 边坡在降雨强度为 q 下的入渗为无压入渗阶段, 湿润峰深度的计算采用式 (1) 计算。当随机变量 $k_s(i) < k_s(st)$ 时, 将 $k_s(i)$ 代入等式 (6) 中计算得到的降雨历时 $t_0(i)$, 有 $t_0(i) \leq t$; 因此, 边坡在降雨强度为 q 下的入渗已经由无压入渗进入有压入渗阶段, 湿润峰深度的计算采用式 (2) 计算。

1.4 稳定性分析模型

根据笔者在文献[9]中的分析, 强降雨条件下, 基岩型层状边坡在基岩面和湿润峰面的安全系数计算式分别为

$$F_r = \frac{(\Delta \gamma h_f + \gamma h) \cos \alpha \tan \varphi + c + \psi_0 \tan \varphi_b}{(\Delta \gamma h_f + \gamma h + \gamma_w h_f) \sin \alpha} \quad (h_f \leq h_{rs}) \quad (8)$$

$$F_s = \frac{\gamma_s \cos \alpha \tan \varphi}{(\gamma_s + \gamma_w) \sin \alpha} + \frac{c}{(\gamma_s + \gamma_w) h_f \sin \alpha} \quad (h_f > h_{rs}) \quad (9)$$

式中 F_r 为边坡基岩面的安全系数; F_s 为边坡湿润峰面的安全系数; γ , γ_s , γ_w 分别为土体的天然重度、饱和重度和水的重度, 重度差 $\Delta \gamma = \gamma_s - \gamma$; h 为边坡土层的厚度, c 和 φ 为土体的强度参数; ψ_0 为边坡土体的基质吸力; φ_b 为边坡土体基质吸力的内摩擦角。

其中, 当 $F_r = F_s = F_{rs}$ 时的临界湿润峰深度的计算式为

$$h_{rs} = \min \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}, \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \right), \quad (10)$$

式中, $b_1 = \Delta \gamma m + \gamma_w m + \gamma_s g - \gamma_s n - \gamma_w n$, $c_1 = gm$,

$$a_1 = \gamma_s \gamma_w - \Delta \gamma \gamma_w, \quad n = \gamma h + (c + \psi_0 \tan \varphi_b) / \cos \alpha \tan \varphi, \\ g = \gamma h, \quad m = c / \cos \alpha \tan \varphi.$$

因此, ①当 $F_{rs} < 1$ 时, 湿润峰深度还没有达到 h_{rs} , 边坡体就沿着基岩面发生破坏, 计算边坡的安全系数采用式 (8), 即 $F = F_r$ 。②当 $F_{rs} = 1$ 时, 湿润峰深度刚好达到 h_{rs} , 边坡处于临界状态, 计算边坡的安全系数采用式 (8) 或 (9), 即 $F = F_r$ 或 $F = F_s$ 。③当 $F_{rs} > 1$ 时, 湿润峰未达到 h_{rs} 前, 计算边坡安全系数采用式 (8), 即 $F = F_r$; 湿润峰深度达到 h_{rs} 后, 边坡体尚未发生破坏, 计算边坡的安全系数采用等式 (9), 即 $F = F_s$ 。

2 基于 M-C 法的可靠度计算模型

为分析基岩型层状边坡在强降雨条件下的稳定性及考虑饱和渗透系数的变异性对边坡失稳概率与安全系数的影响, 本文将边坡土体的饱和渗透系数视为随机变量。

2.1 随机变量的产生

Monte Carlo(M-C)法又称统计试验法或随机抽样技巧法, 而随机变量的产生是建立边坡可靠度分析模型的基础。因此, 本文将边坡土体的饱和渗透系数视为服从均值为 μ_k , 变异系数为 CV , 标准差为 σ 的正态分布; 进而借助 MATLAB 中的正态分布函数来产生一定数量的随机变量 k_s 。

鉴于边坡土体的饱和渗透系数为大于零的实数, 且 Green-Ampt 入渗模型的假设为饱和渗透系数小于降雨强度; 因而, 在随机数的产生过程中先随机产生 $1.3\bar{N}$ 个饱和渗透系数, 尔后筛选出 \bar{N} 个大于零且小于降雨强度的饱和渗透系数随机数。如图 2 为降雨强度为 20 mm/h , 饱和渗透系数的均值 $\mu_k = 8.37 \text{ mm/h}$, 变异系数 $CV = 0.3$, 标准差 $\sigma = \mu_k \cdot CV = 2.511 \text{ mm/h}$ 、模拟次数 $\bar{N} = 10000$ 的随机变量 k_s 的分布直方图, 由图可知, 筛选出来的 10000 个饱和渗透系数均小于降雨强度。

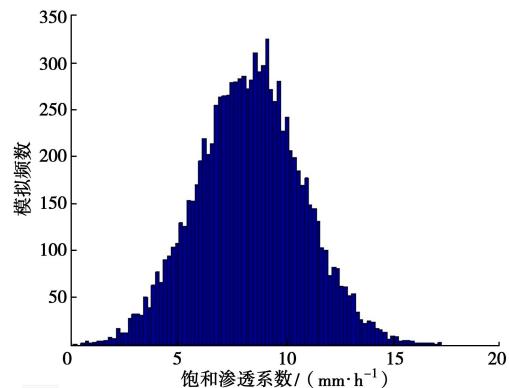


图 2 饱和渗透系数直方图

Fig. 2 Frequency histogram of saturated permeability coefficient

2.2 边坡失稳概率分析

要进行边坡可靠度分析,首先得建立研究目标的极限状态方程。基于前文的分析,基岩型层状边坡在降雨 t 时刻的极限状态方程为

$$g(q(i), t) = F(q(i), t) - 1 \quad (11)$$

由概率统计的大数定律可知,估计边坡发生失稳破坏的概率,可以进行大量的模拟计算,当模拟计算的次数足够大时,即可将边坡发生失稳破坏的频率等价为其概率。在对某一边坡进行可靠度分析时,假设模拟计算的总次数为 \bar{N} ,通过计算得到极限状态方程小于零的次数为 \bar{M} ,则根据 M-C 法原理可知,该边坡发生失稳破坏的概率 P_f 为

$$P_f = \frac{\bar{M}}{\bar{N}} \quad (12)$$

2.3 边坡可靠度分析流程

根据前文的分析可知,在降雨历时 t 时刻,基岩型层状边坡可靠度分析的流程为先随机产生 \bar{N} 个饱和渗透系数 $k_s(i)$,即 $k_s(1), k_s(2), k_s(3), \dots, k_s(i), \dots, k_s(\bar{N}-1), k_s(\bar{N})$;然后根据基岩型边坡降雨入渗模型计算湿润峰深度 $h_f(i)$;尔后将湿润峰深度 $h_f(i)$ 代入基岩型边坡稳定性计算模型,计算边坡在该降雨历时下的安全系数 $F(i)$ 和极限状态方程 $g(q(i), t)$;最后得到极限状态方程小于零的次数 \bar{M} ,从而计算出边坡失稳概率 P_f 。整个计算过程通过 MATLAB 编程实现,其详细计算流程如图 3 所示。

3 工程算例分析

3.1 工程概况与参数选取

2014 年 8 月 31 日至 9 月 3 日,重庆市渝东北地区的云阳、奉节、巫山、巫溪等区县出现持续强降雨天气,其中巫溪县的平均降雨量达到 300 mm/d,局部地区最大降雨量甚至达到 380 mm/d,导致多个乡镇发生滑坡、危岩、泥石流等地质灾害。位于重庆市巫溪县峰灵乡的张家湾滑坡,于 9 月 1 日上午 11 点左右发生失稳破坏。事发后,对该滑坡现场进行了勘察,其上部为厚度 1.5 m 左右的粉质黏土,下部为不透水的砂岩,坡角约 60°,发生失稳的滑动面为基岩面,是典型的基岩型层状滑坡,如图 4 所示。

根据相关报告,该滑坡稳定性及可靠度分析的相关参数选取如表 1 所示。

3.2 模拟计算次数的确定

在进行边坡可靠度分析时,模拟计算次数 \bar{N} 的大小是影响计算精度的重要因素,但模拟计算次数太大必然带来计算工作量的繁琐;因此,合理确定模拟计算次数 \bar{N} 至关重要。本文以张家湾滑坡为例,按降雨

强度 $q = 40 \text{ mm/h}$,饱和渗透系数均值 $\mu_k = 8.37 \text{ mm/h}$,变异系数 $CV = 0.3$,采取不同模拟次数,计算得到了降雨历时 $t = 600 \text{ min}$ 时边坡的失稳破坏概率与安全系数均值,如图 5 所示。

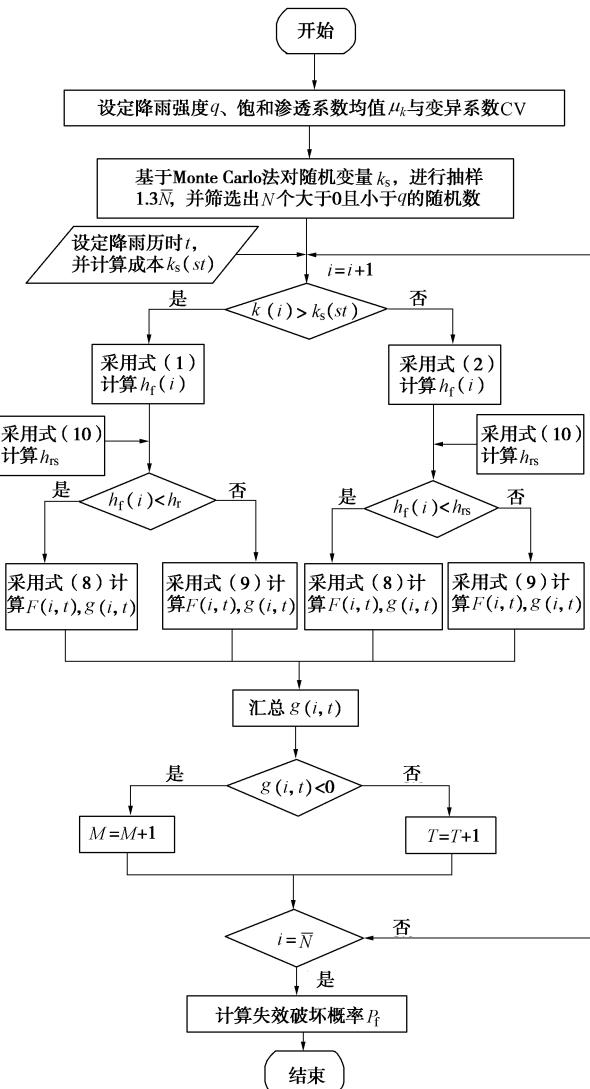


图 3 可靠度计算流程图

Fig. 3 Flow chart of reliability calculation



图 4 张家湾滑坡现场照片

Fig. 4 Picture of Zhangjiawan landslide

由图 5 可知,当模拟次数小于 9000 次时,张家湾滑坡破坏概率随着模拟次数的变化在 36%~50%之间波动变化,其变化差异高达 14%;而安全系数均值也

表1 张家湾滑坡参数

Table 1 Parameters of Zhangjiawan landslide

u_k (mm·h ⁻¹)	h/m	h_s/m	$\Delta\theta$	L/m	$\alpha/(^\circ)$	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	$\gamma_s/(kN\cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\varphi_b/(^\circ)$	ψ_0/kPa
8.37	1.5	0.5	0.35	20	60	15.7	19.2	13.5	36	18	10

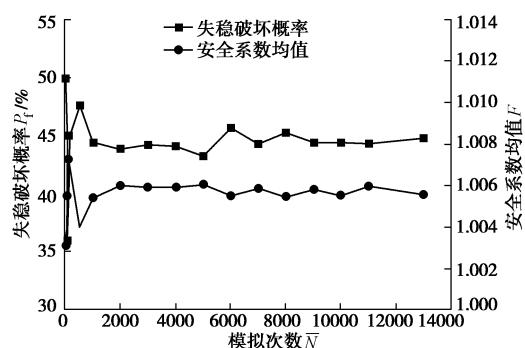


图5 模拟次数对失稳破坏概率与安全系数均值的影响

Fig. 5 Influence of frequency on failure probability and mean values of safety factor

随着模拟次数的不同在 1.00311~1.00725 之间波动变化。当模拟次数大于 9000 次时, 张家湾滑坡破坏概率随着模拟次数的不同, 其变化范围为 44.4%~44.8%, 变化差异仅有 0.4%, 远远小于模拟次数小于 9000 次; 而安全系数均值也随模拟次数的变化趋于稳定, 其变化范围为 1.00555~1.00596。因此, 从提高计算精度和保证计算效率出发, 本文在模拟计算次数上选择 $\bar{N}=10000$ 。

3.3 失稳破坏概率分析

(1) 破坏概率的计算

本文 2.3 节对基岩型层状边坡的失稳破坏概率的计算流程做了详细的阐述, 本节以降雨强度 $q=40 \text{ mm/h}$, 饱和渗透系数均值 $u_k=8.37 \text{ mm/h}$, 变异系数 $CV=0.3$, 采取模拟计算 10000 次, 计算得到了降雨历时 $t=600 \text{ min}$ 时张家湾滑坡安全系数的直方图与破坏概率累积曲线。

由式(7)计算可得, 该降雨条件下的临界饱和渗透系数 $k_s(st)=14.545 \text{ mm/h}$ 。因此, 当随机变量 $k_s(i)>14.545 \text{ mm/h}$ 时, 边坡在饱和渗透系数为 $k_s(i)$ 下的入渗为无压入渗阶段, 湿润峰深度的计算采用式(1)计算; 当随机变量 $k_s(i)\leq 14.545 \text{ mm/h}$ 时, 边坡在饱和渗透系数为 $k_s(i)$ 下的入渗已经由无压入渗进入有压入渗阶段, 湿润峰深度的计算采用式(2)计算。最后, 将计算得到的湿润峰深度代入安全系数的计算式中, 从而得到安全系数; 图 6, 7 为该降雨条件下张家湾滑坡安全系数的直方图与累积破坏概率曲线。

由图 6 可知, 通过计算, 该降雨条件下安全系数的均值为 1.00555, 由确定性分析方法可得此时的安全系数大于 1, 滑坡处于稳定状态。然而, 由图 7 可知,

在 10000 次的模拟计算中, 有 4447 次的计算结果小于 1, 即滑坡在该降雨条件下的破坏概率高达 44.47%。因此, 仅仅采用安全系数判定边坡的稳定性必然存在一定的不足, 不能充分说明其危险性。

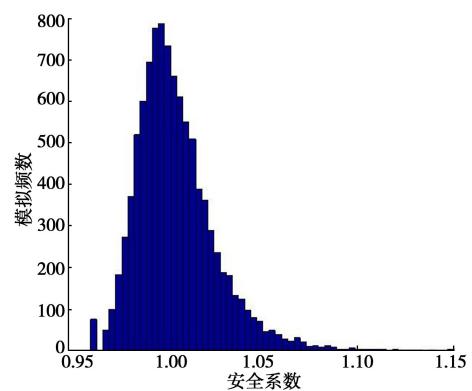


图6 安全系数直方图

Fig. 6 Frequency histogram of safety factor

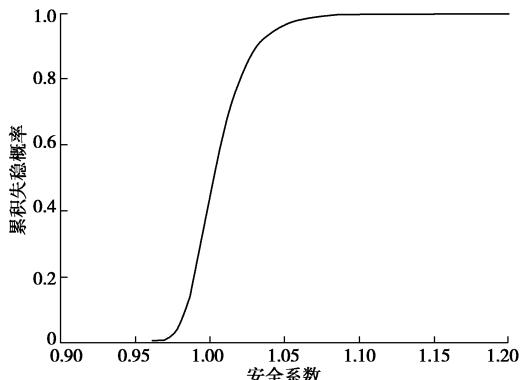


图7 累积分布函数图

Fig. 7 Graph of cumulative distribution function

(2) 破坏概率的时程曲线

降雨条件下, 张家湾滑坡的稳定性及其失稳破坏的概率是随着降雨历时不断发生变化的; 因此, 基于本文建立的基岩型层状边坡可靠度计算模型, 考虑饱和渗透系数的变异性, 对张家湾滑坡在不同降雨历时时刻进行了不同降雨强度下的失稳破坏概率分析, 如图 8 所示。由图 8 可知:

a) 在同一降雨强度下, 当变异系数为某一定值时, 张家湾滑坡发生失稳破坏的概率随降雨历时的增加呈三阶段变化。降雨初期, 滑坡处于稳定状态, 其发生失稳破坏的概率为 0; 降雨一段时间后, 滑坡处于相对不稳定状态, 其发生失稳破坏的概率随降雨历时的

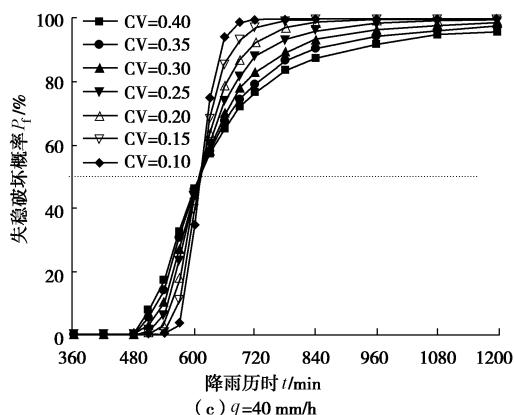
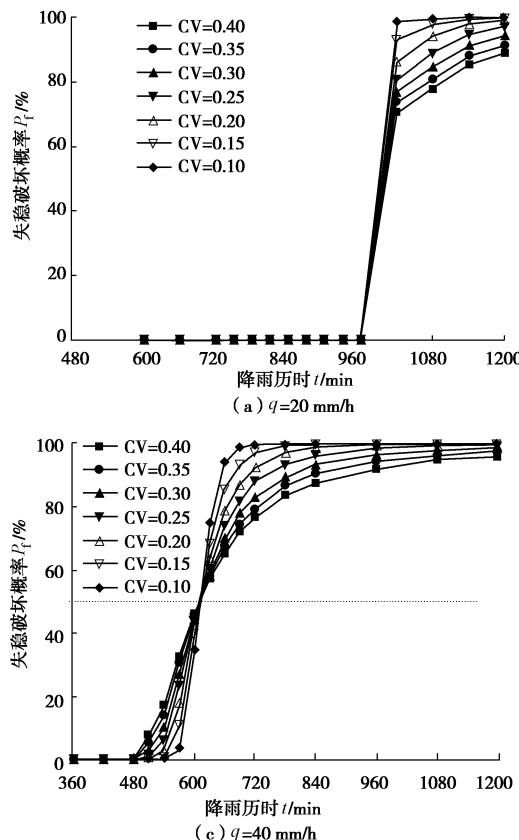
增加而不断增大；降雨后期，滑坡处于不稳定状态或已经发生失稳破坏，其发生失稳破坏的概率为 100%。

b) 由图 8 (a) 可知，当降雨强度为 20 mm/h 时，张家湾滑坡的失稳破坏具有一定的突发性；如饱和渗透系数的变异系数为 0.2，且降雨历时由 960~1020 min 时，滑坡的破坏概率由 0 突然增加到 86.31%。因此，可推断基岩型层状边坡在考虑饱和渗透系数变异性时，在低降雨强度下的失稳破坏具有突发性的特点。

c) 在相同降雨强度与降雨历时条件下，变异系数对滑坡的失稳破坏概率的影响不同。分析 4 个降雨强度下的失稳破坏概率时程曲线可知，在相同降雨条件下，可将失稳破坏概率为 50% 作为分界点；当失稳破坏概率小于 50% 时，变异系数越大、滑坡发生失稳破坏的概率越大；当失稳破坏概率大于 50% 时，变异系数越小、滑坡发生失稳破坏的概率越大。因此，在基岩型层状边坡稳定性及可靠度分析时，参数的分布越集中，结果越准确。

(3) 变异系数的影响

为探索饱和渗透系数的变异性对滑坡失稳破坏概率的影响；本文在对张家湾滑坡进行失稳破坏概率计算时，将饱和渗透系数的变异系数分布设置为 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40；得到了不同降



雨时刻与降雨强度下，张家湾滑坡发生失稳破坏的概率与变异系数的关系曲线，如图 9 所示。由图 9 可知，随着降雨历时的增加，张家湾滑坡在不同降雨强度下的失稳破坏概率均有不同程度的增大。由各降雨条件下，张家湾滑坡的失稳破坏概率随变异系数的变化曲线可知，当 P_f 小于 50% 时，滑坡发生失稳破坏的概率随变异系数的增加而不断增大；当 P_f 趋于 50% 时，变异系数的变化对滑坡发生失稳破坏概率的影响甚小；当 P_f 大于 50% 时，滑坡发生失稳破坏的概率随变异系数的增加而不断减小。

(4) 降雨强度的影响

为分析降雨强度对滑坡失稳破坏概率的影响，本文对张家湾滑坡的降雨强度设置了 7 个不同强度值，分别为 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 mm/h；计算得到了张家湾滑坡在降雨历时为 480, 540, 600, 660, 720, 780 min 时的失稳破坏概率，如图 10 所示。由图可知，降雨强度对张家湾滑坡失稳破坏概率的影响为：

a) 当边坡土体饱和渗透系数的变异系数为某一定值时，张家湾滑坡发生失稳破坏的概率随着降雨强度的增加而不断增大；即降雨强度越大，在相同降雨历时下，张家湾滑坡湿润峰的深度越大，边坡土体下滑

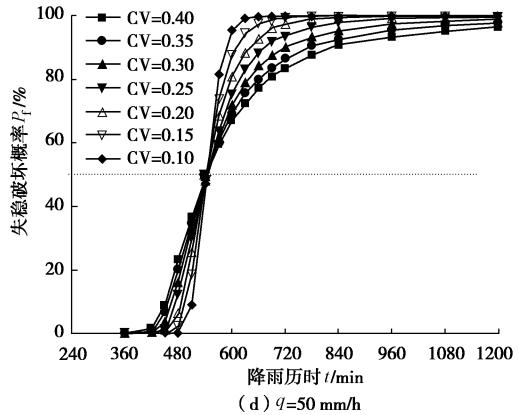
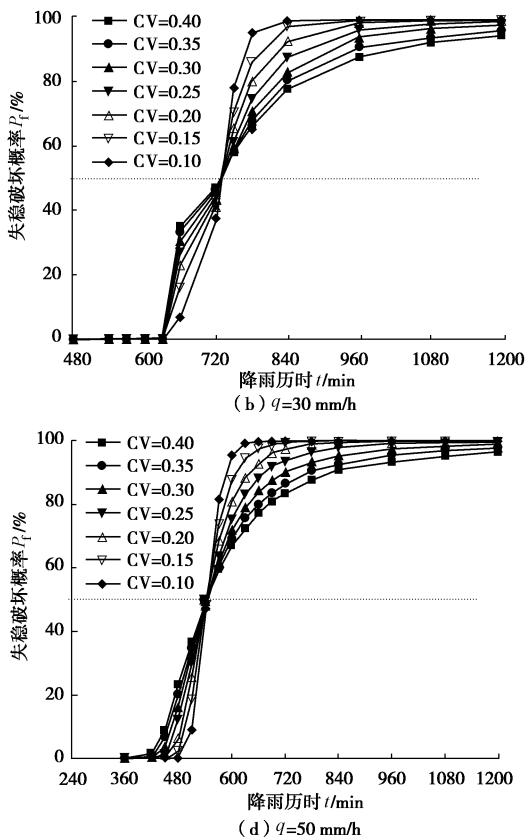


图 8 张家湾滑坡失稳破坏概率的时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of failure probability of Zhangjiawan landslide under different rainfalls

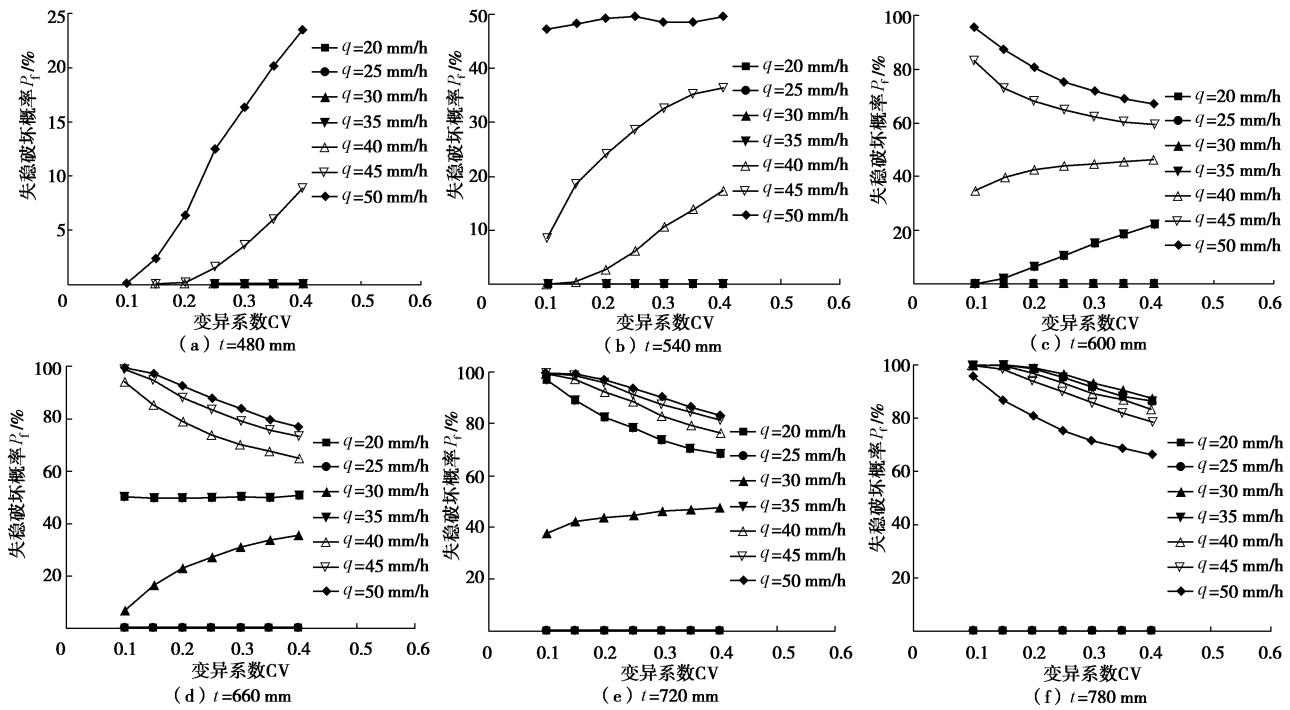


图 9 变异系数对张家湾滑坡失稳破坏概率的影响

Fig. 9 Influence of variation coefficients on failure probability of Zhangjiawan landslide under different rainfalls

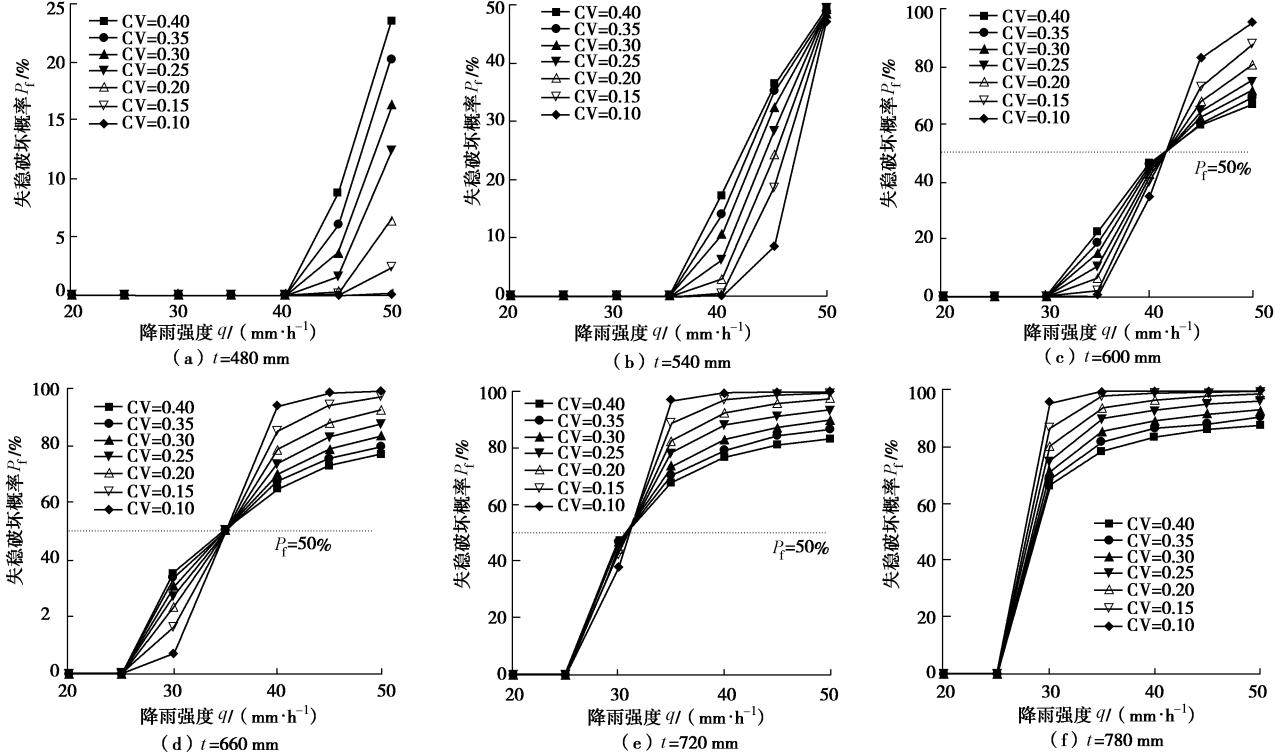


图 10 降雨强度对张家湾滑坡失稳破坏概率的影响

Fig. 10 Influence of rainfall intensity on failure probability of Zhangjiawan landslide

力的增量也越大,发生失稳破坏的概率也就越大。

b) 当降雨历时小于 720 min 时,张家湾滑坡发生失稳破坏的概率随着降雨强度的增大逐渐增加;当降雨历时为 720 min 或 780 min 时,降雨强度由 25 mm/h 增大到 30 mm/h 时,张家湾滑坡发生失稳破坏的概率由 0 迅速增加,其变化具有突发性;即对于某一基岩型边坡,当经历了前期连绵细雨的入渗后,在突遇特

大暴雨后的失稳破坏具有突发性,其危险性不容忽视。

3.4 边坡安全系数分析

安全系数的大小是评价边坡稳定性的重要标准之一;然而,在降雨作用下,饱和渗透系数的变异性对边坡安全系数也有不同程度的影响。图 11 为不同降雨强度下,考虑饱和渗透系数变异性时,张家湾滑坡安全系数的时程曲线。由图可知:

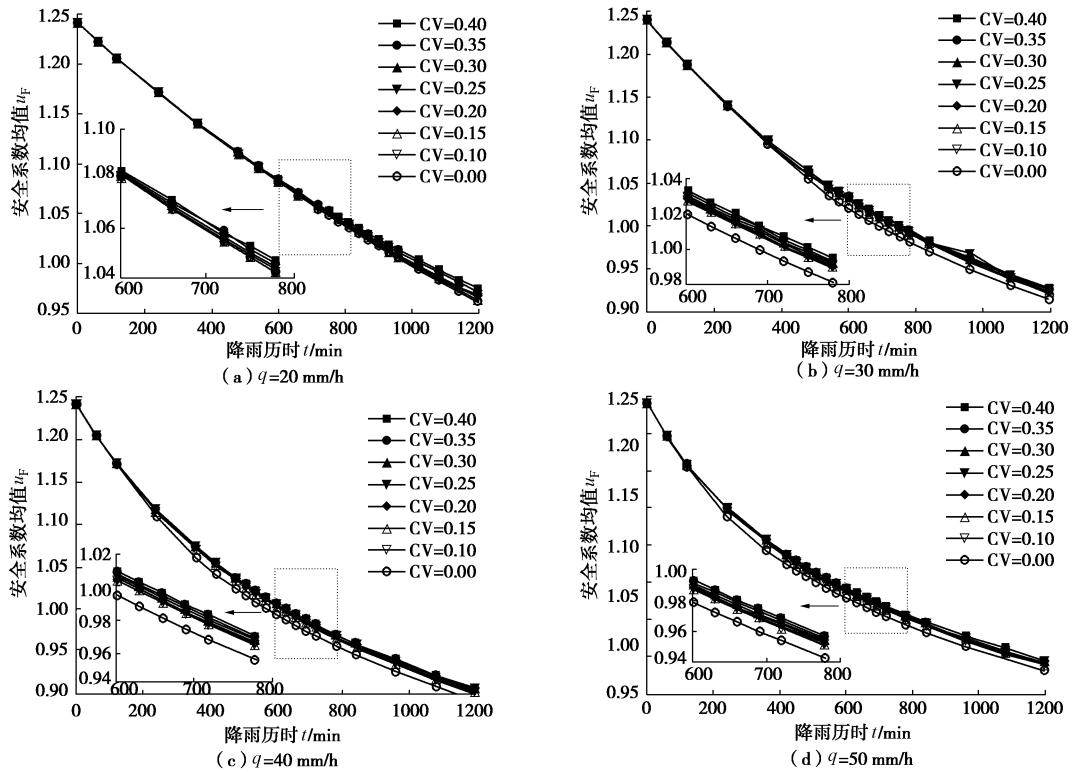


图 11 张家湾滑坡安全系数均值的时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of mean values of safety factor of Zhangjiawan landslide under different rainfalls

(1) 降雨作用下, 张家湾滑坡的安全系数均值随着降雨历时的增加不断衰减; 且降雨强度越大, 安全系数衰减的越快; 即降雨强度越大, 边坡的稳定性越差。

(2) 饱和渗透系数是影响降雨在边坡体内入渗的重要参数, 因而饱和渗透系数的变异性必然对边坡安全系数具有一定的影响。本节将张家湾滑坡在降雨历时为 600~780 min 的安全系数时程曲线进行了局部的放大, 并列于图 12。由图 12 可知, 饱和渗透系数的变异系数越大, 安全系数的均值也越大, 即边坡土体颗粒分布越均匀, 对边坡稳定性越不利。当降雨强度较小 (20 mm/h) 时, 饱和渗透系数的变异系数对张家湾滑坡安全系数均值的影响较小, 与不考虑其变异性 ($C.V = 0.0$) 相差甚微; 然而, 当降雨强度增大 (30, 40, 50 mm/h) 后, 不考虑饱和渗透系数的变异性时, 安全系数的计算结果偏小, 在边坡加固设计时可能存在超强加固, 出现不同程度的人力、财力浪费。因而, 适当考虑饱和渗透系数的变异性对边坡稳定性的分析更加符合实际。

4 结 论

(1) 基于笔者在前期研究中建立的基岩型层状边坡的降雨入渗模型及稳定性分析模型, 结合 M-C 法提出了考虑边坡土体饱和渗透系数变异性的基岩型层状边坡稳定性可靠度计算模型, 并基于 MATLAB

编程实现了边坡失稳破坏概率的计算。

(2) 利用本文建立的基岩型层状边坡稳定性可靠度计算模型, 考虑了土体饱和渗透系数的变异性, 对张家湾滑坡在不同降雨强度下的失稳破坏概率进行了分析; 由失稳破坏概率时程曲线可知, 基岩型层状边坡在考虑饱和渗透系数变异性时, 在低降雨强度下的失稳破坏具有突发性。

(3) 在分析土体饱和渗透系数变异性对张家湾滑坡失稳破坏概率的影响时, 可将失稳破坏概率为 50% 作为分界点; 当失稳破坏概率小于 50% 时, 变异系数越大、滑坡发生失稳破坏的概率越大; 当失稳破坏概率大于 50% 时, 变异系数越小、滑坡发生失稳破坏的概率反而越大。然而, 在分析土体饱和渗透系数变异性对张家湾滑坡安全系数的影响时, 饱和渗透系数的变异系数越大, 安全系数的均值也越大。

(4) 通过对张家湾滑坡稳定性可靠度的分析可知, 单凭安全系数判定边坡稳定性的传统方法有时会与实际不符; 因此, 考虑计算参数的变异性, 以不确定性分析方法, 计算边坡的失稳破坏概率, 联合安全系数与失稳破坏概率来判定边坡的稳定性更加符合实际。

参 考 文 献:

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU

- Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics part: I the flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4:1 - 24.
- [3] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. Water Resources Research, 2006, 42(7): 887 - 896.
- [4] MUNTOHAR A H J. Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm[J]. Natural Hazards, 2010, 54(3): 967 - 984.
- [5] ZHANG J, HUANG H W, ZHANG L M, et al. Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model[J]. Engineering Geology, 2013, 168(1): 129 - 140.
- [6] 常金源, 包含, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 995 - 1001. (CHANG Jin-yuan, BAO Han, WU Fa-quan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 995 - 1001. (in Chinese))
- [7] 马世国, 韩同春, 徐日庆. 强降雨和初始地下水对浅层边坡稳定的综合影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 803 - 810. (MA Shi-guo, HAN Tong-chun, XU Ri-qing. SIIntegrated effect of intense rainfall and initial groundwater on slope stability[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 803 - 810. (in Chinese))
- [8] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439 - 445. (WANG Ding-jian, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439 - 445. (in Chinese))
- [9] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 强降雨条件下基岩型层状边坡入渗模型及稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3156 - 3164. (QIN Xiao-hua, LIU Dong-sheng, SONG Qiang-hui, et al. Rainfall infiltration and stability analysis of bedrock laminar slope under heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3156 - 3164. (in Chinese))
- [10] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 115 - 122. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, LIU Xin-rong, et al. Finite element of reliability computation and sensitivity analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 115 - 122. (in Chinese))
- [11] 李典庆, 邱小辉, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的无限长边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1799 - 1806. (LI Dian-qing, QI Xiao-hui, ZHOU Chuang-bing, et al. Reliability analysis of infinite soil slopes considering spatial variability of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1799 - 1806. (in Chinese))
- [12] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Probabilistic infinite slope analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4): 577 - 584.
- [13] 蒋水华, 李典庆, 周创兵. 基于拉丁超立方抽样的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 70 - 76. (JIANG Shui-hua, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing. Non-intrusive stochastic finite element method for slope reliability analysis based on Latin hypercube sampling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 70 - 76. (in Chinese))
- [14] 吴应祥, 刘东升, 宋强辉, 等. 基于有限元强度折减法的边坡动力稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2084 - 2090. (WU Ying-xiang, LIU Dong-sheng, SONG Qiang-hui, et al. Reliability analysis of slope dynamic stability based on strength reduction FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2084 - 2090. (in Chinese))
- [15] 黄景华, 陈朝晖, 莫玻, 等. 参数特性及分布形式对边坡稳定可靠性的影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 23 - 40. (HUANG Jing-hua, CHEN Zhao-hui, MO Bo, et al. Influence analysis of characteristics and distribution types of soil parameters on slope reliability[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(3): 23 - 40. (in Chinese))
- [16] 豆红强, 韩同春, 龚晓南, 等. 降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1144 - 1152. (DOU Hong-qiang, HAN Tong-chun, GONG Xiao-nan, et al. Reliability analysis of slope stability considering variability of soil saturated hydraulic conductivity under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1144 - 1152. (in Chinese))