

毕仲辉, 翟亚飞, 唐彧杰, 等. 基于有限元强度折减法的降雨入渗基岩型边坡可靠度分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 187-192.  
 BI Zhonghui, ZHAI Yafei, TANG Yujie, et al. Finite element strength reduction method-based reliability analysis on rainfall-infiltrated bed-rock-typed slope [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9): 187-192.

# 基于有限元强度折减法的降雨入渗 基岩型边坡可靠度分析

毕仲辉<sup>1</sup>, 翟亚飞<sup>1</sup>, 唐彧杰<sup>1</sup>, 崔丙会<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

**摘要:** 边坡土体在自然状态下呈现出不确定性, 内摩擦角和黏聚力表现为一定的变异性。为探究降雨入渗条件下边坡的稳定性和失效概率, 结合强度折减法和二次响应面分析方法, 建立了考虑内摩擦角和黏聚力变异性的概率分析模型。针对四川省阿坝州松潘县一基岩型层状边坡, 探讨了内摩擦角和黏聚力的相关系数、变异系数以及降雨强度对该边坡失效概率的影响。结果表明: 该边坡在天然条件下为中等危险状态; 边坡失效概率与降雨历时及强度呈现正相关关系; 当边坡失效概率小于 50% 时, 变异系数越大, 失效概率越大; 当边坡失效概率大于 50% 时, 变异系数越小, 失效概率越大; 黏聚力的变异性对边坡失效概率的影响小于内摩擦角的变异性。

**关键词:** 降雨入渗; 改进一次二阶矩法; 二次响应面法; 有限元强度折减法; 失效概率

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.09.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)09-0187-06



## Finite element strength reduction method-based reliability analysis on rainfall-infiltrated bedrock-typed slope

BI Zhonghui<sup>1</sup>, ZHAI Yafei<sup>1</sup>, TANG Yujie<sup>1</sup>, CUI Binghui<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to explore the stability and failure probability of the slope under the condition of rainfall infiltration, an internal friction angle and cohesion variability-considered probability analysis model is established herein in combination with both the strength reduction method and the quadratic response surface analysis method. Targeting at a bedrock-typed stratified slope in Songpan County of Aba Prefecture in Sichuan Province, the influences from the correlation coefficient and the coefficient of variation of the internal friction angle and cohesion as well as rainfall intensity on the failure probability of the slope are discussed. The analysis result shows that the slope is in a mid-dangerous status under the natural condition, while the failure probability of the slope exhibits a positive correlation with rainfall duration and intensity. When the failure probability of the slope is less than 50%, the larger the coefficient of variation is, the larger the failure probability is to be. When the failure probability of the slope is larger than 50%, the less the coefficient of variation is, the larger the failure probability is to be; meanwhile, the influence from the variability of cohesion on the failure probability of the slope is less than that from the variability of the internal friction angle.

**Keywords:** rainfall infiltration; improved linear second order moment method; quadratic response surface method; finite element

收稿日期: 2020-03-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404903); 国家自然科学基金项目(51709090)

作者简介: 毕仲辉(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定及可靠度方面的研究。E-mail: zhbi@hhu.edu.cn

strength reduction method; failure probability

## 0 引言

据统计资料显示, 边坡失稳之前都伴随有大量的降雨, 在中国, 每年因降雨诱发的滑坡有成千上万个。基岩型层状边坡作为一种典型的边坡, 其覆盖层为一定厚度的土体, 覆盖层下面为不透水的基岩, 其组成形式和失稳破坏机理不同于其他的均质边坡。因此, 有必要分析基岩型层状边坡在雨水入渗作用下的失稳破坏机理和可靠度。

国内外学者就降雨诱发边坡失稳展开了大量的理论研究, 为预防滑坡提供了理论基础。CHO 等<sup>[1]</sup>提出了一种降雨条件下非饱和边坡安全系数的计算方法; 徐晗等<sup>[2]</sup>提出了基于多参数的流固耦合有限元计算模型; 张社荣等<sup>[3]</sup>基于强度折减理论研究了饱和-非饱和边坡的抗滑稳定性, 并且确定了边坡的安全系数; 史振宁等<sup>[4]</sup>基于降雨入渗试验模型, 研究了土体的初始含水率分布状态以及降雨入渗下土体含水率的变化规律。然而, 上述研究成果主要基于确定性边坡土体参数, 即土体材料参数为定值。事实上, 边坡土体受内部构造、应力演化和环境作用等要素影响, 土体材料特性表现出明显的不确定性<sup>[5]</sup>。边坡土体材料的变异性会导致不同的危险滑动面, 因此在降雨入渗边坡失稳机理的分析时, 很有必要考虑边坡土体参数的变异性。黄景华等<sup>[6]</sup>采用简化 Bishop 法和瑞典条分法对边坡的可靠度进行分析; 李典庆等<sup>[7]</sup>基于无限长边坡物理模型, 提出了土体抗剪参数均值随深度变化的概率分析方法; 吴应祥等<sup>[8]</sup>利用有限元强度折减理论探讨了边坡在动力作用下的可靠度; 豆红强等<sup>[5]</sup>建立了考虑饱和和渗透系数变异性的降雨入渗概率分析框架, 探究了饱和和渗透系数变异系数对边坡失效概率的影响。目前, 对边坡可靠度分析大都基于土质边坡, 在降雨入渗条件下, 考虑土体抗剪参数变异性的层状基岩型边坡的可靠度分析研究较少。

本文在前人分析的基础上, 结合工程实例, 研究建立了降雨入渗条件下层状基岩型边坡的有限元强度折减模型, 并基于二次响应面分析方法, 探究雨水入渗与土体抗剪参数变异性耦合作用下的边坡失效机理, 揭示了土体相关系数、降雨强度和变异系数对基岩型边坡失效概率的影响规律, 研究成果为基岩型层状边坡的抗滑稳定提供参考。

## 1 计算理论与计算方法

### 1.1 流固耦合数学模型

利用 Galerkin 有限元的方法, 离散化节点孔压和位移, 可得流固耦合控制方程<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} [K] \{\Delta\delta\} - [L] \{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} \\ - [B]^T \{\Delta\delta\} - \Delta t [D] \{\Delta\bar{p}\} = \{R\} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $[K]$  为刚度矩阵;  $\{\Delta\delta\}$  为位移增量;  $[L]$  为节点孔压对应的节点力;  $\{\Delta\bar{p}\}$  为孔压增量;  $\{F\}$  为节点外荷载;  $\{I\}$  为增量迭代过程中上一增量步中的不平衡力;  $[B]$  为节点变形对应的流体体积变化;  $[D]$  为孔压变化对应的流体体积变化;  $\{R\}$  为流体体积变化的修正量;  $\Delta t$  为时间步长。

### 1.2 强度折减理论

强度折减理论<sup>[9]</sup>广泛应用在边坡的稳定分析中, 主要的方法是将原始土体的强度参数  $c$  和  $\varphi$  按照一定的系数  $k$  进行折减, 将折减得到  $c'$  和  $\varphi'$  作为新的材料系数, 导入模型中进行计算, 按照这样不断的折减, 直至边坡开始出现破坏时, 此刻的强度折减系数就是边坡的安全系数  $k_s$ 。基于 MC 本构关系的强度折减公式为

$$\tan \varphi' = \tan \varphi / k \quad (2)$$

$$c' = c / k \quad (3)$$

## 2 可靠度计算模型

### 2.1 二次响应面模型

二次响应面方法是结构可靠度计算中的一种重要方法, 适用于没有解析表达式的复杂结构系统和需要用有限元法等数值计算方法进行评价的模型。这种方法是通过有效结构的分析, 用显式的函数去构造隐式的极限状态函数, 从而通过显式的极限状态函数来计算结构的失效概率和可靠度。

对于基本随机变量为  $X$  的结构, 假设结构极限状态函数为<sup>[10]</sup>

$$Z = g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

二次响应面函数的表达式为<sup>[10]</sup>

$$Z_r = \hat{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (5)$$

式中,  $a$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为待定系数。

### 2.2 改进一次二阶矩法

改进一次二阶矩法是将极限状态函数通过泰勒展

开点选在失效面上。设  $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$  为极限状态面上的一点, 即

$$\widehat{g}(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (6)$$

在点  $\mathbf{x}^*$  处按 Taylor 级数展开, 取一次项, 有

$$Z_L = \widehat{g}(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \widehat{g}}{\partial X_i}(x_i - x_i^*) \quad (7)$$

在随机变量  $X$  空间, 方程  $Z_L = 0$  为经过  $\mathbf{x}^*$  处的极限状态面的一个切平面, 则  $Z_L$  的均值和标准差分别为

$$\mu_{Z_L} = \widehat{g}(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i}(\mu_{X_i} - x_i^*) \quad (8)$$

$$\sigma_{Z_L} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (9)$$

由此可得结构的可靠度指标为

$$\beta = \frac{\mu_{Z_L}}{\sigma_{Z_L}} = \frac{\widehat{g}(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i}(\mu_{X_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (10)$$

定义变量  $X_i$  的灵敏度系数如下

$$\alpha_{X_i} = \cos \theta_{X_i} = \frac{\mu_{Z_L}}{\sigma_{Z_L}} = - \frac{\frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (11)$$

极限状态面上的设计验算点  $p^*$  在原始  $X$  空间中的坐标为

$$x_i^* = \mu_{X_i} + \beta \sigma_{X_i} \cos \theta_{X_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

### 2.3 可靠度分析流程

基于 ABAQUS 和 MATLAB 的可靠度分析流程为: 第一步将摩擦角  $\varphi$ 、黏聚力  $c$  的均值  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_\varphi, \mu_c)^T$  作为中心点, 在区间  $(\mu_\varphi - f\sigma_\varphi, \mu_\varphi + f\sigma_\varphi)$  和  $(\mu_c - f\sigma_c, \mu_c + f\sigma_c)$  中选取样本点, 取迭代尺度参数  $f = 1.414$ , 形成系数矩阵  $A_{5 \times 5}$ ; 第二步将样本点参数分别代入 ABAQUS 的边坡模型中, 根据强度折减法得到其安全系数  $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_5)^T$ , 求解出系数  $a, b_i, c_i (i = 1, 2)$ ; 通过改进一次二阶矩法计算出可靠度指标  $\beta$ 、失稳概率及新验算点  $\mathbf{x}^*$ , 这样完成第一次迭代。根据验算点  $\mathbf{x}^*$ , 通过线性插值计算新的展开点  $\mathbf{x}$ , 有

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\mu}_X + \frac{\widehat{g}(\boldsymbol{\mu}_X)}{\widehat{g}(\boldsymbol{\mu}_X) - \widehat{g}(\mathbf{x}^*)}(\mathbf{x}^* - \boldsymbol{\mu}_X) \quad (13)$$

将  $\mathbf{x}$  作为第二次迭代的中心点, 步骤同第一次。重复步骤, 直到前后两次  $\|\mathbf{x}\|$  相差  $< \varepsilon$ 。由此计算降雨入渗边坡的失效概率。

## 3 工程算例分析

### 3.1 工程概况和气象水文条件

以四川省阿坝州某工程为例, 该工程位于四川省阿坝州松潘县。松潘县地处青藏高原东缘的岷山山脉中部, 区内地形差异显著, 主要为高中山, 且海拔相差比较大。

由于地势差异大, 导致松潘县气候呈现地域性变化的特点, 气候变化复杂多样且气象灾害频发。降水时空上分布不均匀, 夏季的降雨量占全年的 80%, 年平均降水量达到 700 mm 以上。

### 3.2 边坡有限元模型建立和材料属性

边坡的有限元模型如图 1 所示。边坡高 28.78 m, 坡脚长 12.58 m, 坡顶长 12.13 m。边坡覆盖层为粉质黏土, 下层为不透水的变质细砂岩。地下水位线位于坡脚以下 2.5 m 处。边坡的位移边界条件为两侧施加链杆约束, 底部施加固端约束; 覆盖层的流量边界条件为两侧和地下水位以下是定水头边界, 底部为不透水边界。边坡采用 ABAQUS 中的孔压/位移耦合的 CPE4P 单元模拟。自重作用下的地应力场作为边坡的初始应力场。通过现场钻孔、原位测试和室内试验, 得到边坡土体参数如表 1 所列。土体的水力渗透曲线和土水特征曲线采用文献 [1] 中模型来估算, 曲线如图 2 所示。

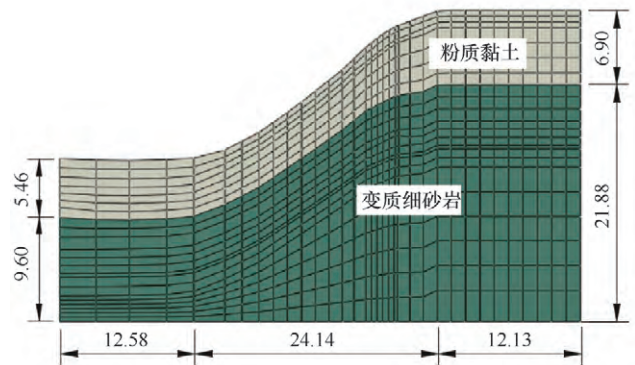


图 1 层状边坡有限元模型(单位: m)

### 3.3 确定性分析

在考虑土体抗剪强度参数黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  变异性之前, 首先需要进行基于变异系数  $COV$  为 0 的确定性分析。计算时采用 ABAQUS 中的流固耦合方法, 先计算自重作用下的稳态渗流场, 为后面计算提供初始条件; 然后计算在降雨和自重作用下的瞬

表 1 边坡有限元模型的计算参数

参数	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $m$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	干密度 $r_d/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙比 $e$	饱和渗透系数 $k_{\text{res}}/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$
粉质黏土	1.2	0.30	13.05	24.6	2 030	1.05	3
变质细砂岩	5 000.0	0.25	4 000.00	35.0	2 400	-	-

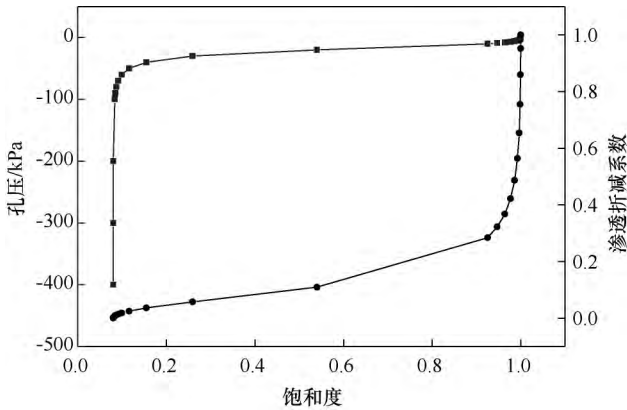


图 2 孔压和渗透折减系数随饱和度变化曲线

态渗流, 设置模型中每荷载步的最大孔压改变值为 10 kPa, 最大的增量步大小为 1 d, 初始增量步大小设置为 0.1 d; 最后对降雨后的边坡进行强度折减, 得到在不同降雨持时下的安全系数。

根据四川省阿坝州松潘县近几十年的降雨气象资料显示, 日最大降雨量为 50 mm(平均降雨强度为 2.27 mm/h), 持续降雨时间最长为 22 d。因此, 本文采用持续性降雨, 确定性分析降雨方案如表 2 所列。

表 2 确定性分析降雨方案

参数	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	饱和渗透系数 $k_{\text{res}}/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	降雨强度 $/\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	降雨持时/d
粉质黏土	17.05	24.6	9.2	48	0~22

注: 降雨持时 0~22 d 表示降雨持时分别为 0, 2, 4, ..., 22 d 共 12 个工况

图 3 是边坡覆盖层土体为确定性参数时, 安全系数随着降雨持时变化的关系曲线。从图 3 中可以看出, 边坡安全系数随着降雨持时的增加不断递减, 且当降雨持时大于 10 d 时, 对应的安全系数开始小于 1, 边坡将处于失稳状态。

### 3.4 概率分析

为考虑边坡覆盖层粉质黏土分布不均匀的特性, 需采用概率分析方法对其稳定性进行分析。根据土体测试结果, 覆盖层粉质黏土内摩擦角的平均变异系数为 0.3, 黏聚力的平均变异系数为 0.25。本文边坡覆盖层粉质黏土的抗剪强度参数服从正态分布。

#### 3.4.1 相关系数的影响

土体抗剪参数  $\varphi$  和  $c$  之间具有一定相关性。根据

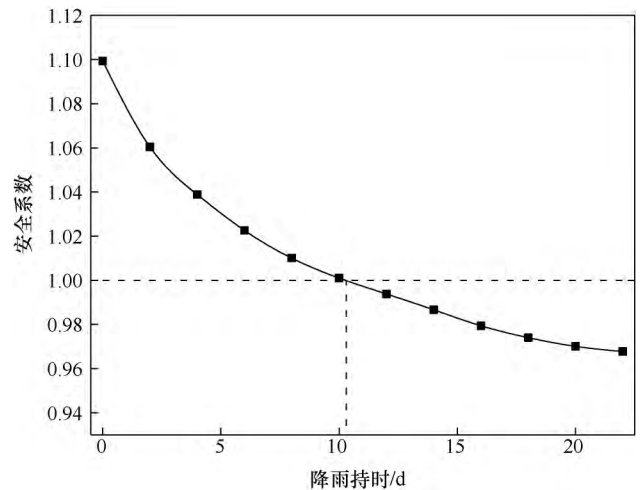


图 3 安全系数与降雨持时关系曲线

前人的研究成果,  $\varphi$  和  $c$  的相关系数在 -0.5 至 0.5 之间。因此, 分别取相关系数为 -0.5, -0.3, 0, 0.3, 0.5, 探讨相关系数大小对失效概率的影响。 $c$  和  $\varphi$  分别取其均值为 24.6° 和 13.05 kPa, 变异系数分别为 0.3 和 0.25。降雨的强度为 48 mm/d, 设置降雨持时分别为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 d。图 4 为不同相关系数下降雨持时与失效概率之间的关系曲线。从图 4 可以看出:

(1) 当相关系数一定时, 失效概率均随降雨持时增大, 即在相同的降雨强度下, 该滑坡的湿润峰越大, 边坡覆盖层的相对下滑力也越大, 越容易发生失效破坏。

(2) 当降雨持时为 0 时, 即自然状态下, 失效概率达到 30% 以上, 根据学者徐卫亚<sup>[11]</sup>提出的危险判定准则, 该边坡在自然条件下处于中等危险状态。

(3) 在相同的降雨持时和强度下, 可将降雨持时 10 d 作为分界点; 当降雨持时在 0~10 d 时, 该边坡的失效概率随着  $c$  和  $\varphi$  的相关系数的增加而不断的增大; 当降雨持时在 10~22 d 时, 该边坡的失效概率随着抗剪参数  $c$  和  $\varphi$  的相关系数的增加而不断的减小。

#### 3.4.2 变异系数的影响

为探究抗剪参数变异系数变化对边坡覆盖层土体稳定性的影响, 本文对该边坡覆盖层土体黏聚力和内摩擦角分别进行分析。根据 Ingles<sup>[12]</sup>教授研究给出的黏性土体抗剪参数变异取值范围, 对黏聚力设置三个不同的变异系数分别为 0.25、0.35 和 0.45, 内摩擦

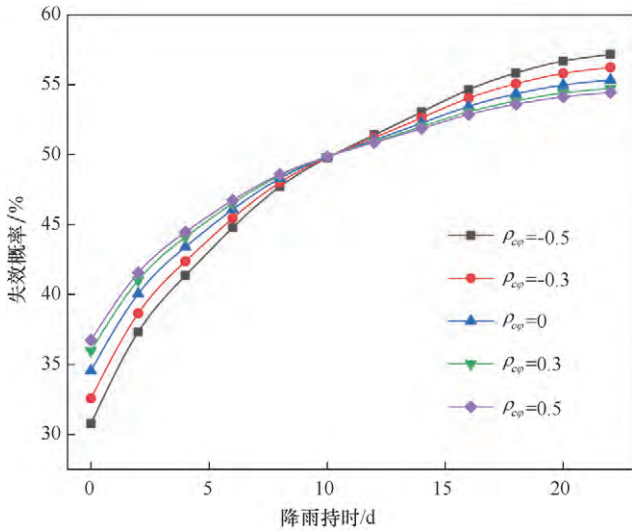


图4 抗剪参数相关性对边坡失效概率的影响

角设置三个不同的变异系数分别为 0.2、0.3 和 0.4。当内摩擦角的变异系数为 0.3，降雨强度为 48 mm/d 时，计算得到不同的黏聚力变异系数下，降雨持时为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 d 的失稳破坏概率，计算结果如图 5(a) 所示；当黏聚力的变异系数为 0.25，降雨强度为 48 mm/d 时，计算得到不同的内摩擦角变异系数下，降雨持时为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 d 的失效概率，计算结果如图 5(b) 所示。

由图 5 可知，在相同的降雨持时和强度下，可将失效概率 50% 作为分界点：当失效概率小于 50% 时，该边坡的失效概率随着变异系数的增加不断地增大；当失效概率接近 50% 时，变异系数的变化对失效概率的影响不明显；当失效概率大于 50% 时，失效概率随着变异系数的增加而不断的减小。分析图 5(a) 和图 5(b) 可知，在相同的降雨条件下，对边坡失效概率的影响，黏聚力变异系数的影响要小于内摩擦角变异系数。

### 3.4.3 降雨强度的影响

为探究降雨强度对边坡覆盖层土体稳定性的影响，本文设置 4 个不同的降雨强度值，分别为 16, 32, 48, 64 mm/d，计算得到降雨持时为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 d 的失效概率，计算结果如图 6 所示。分析图 6 可知，当降雨持时为一一定值时，随着降雨强度的增大，边坡的失效概率不断递增；而在持续降雨前期，降雨强度越大，失效概率曲线斜率越大。这是由于降雨强度大时，湿润峰深度增量也较大，基质吸力降低较快，导致土体的抗剪强度快速减弱，更加容易发生失稳破坏。

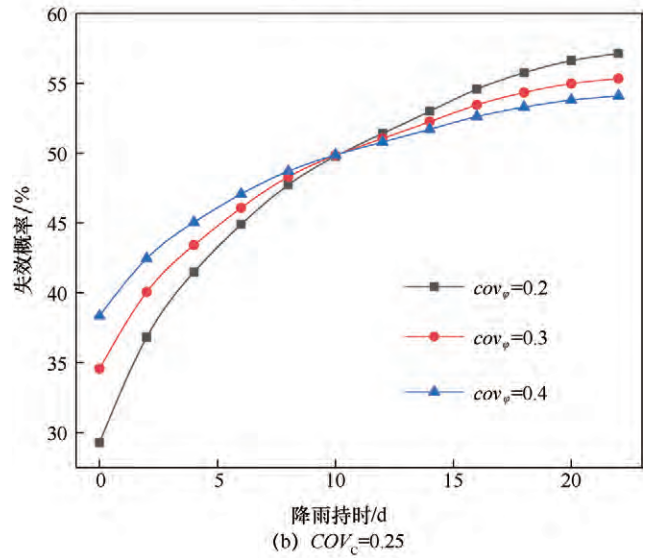
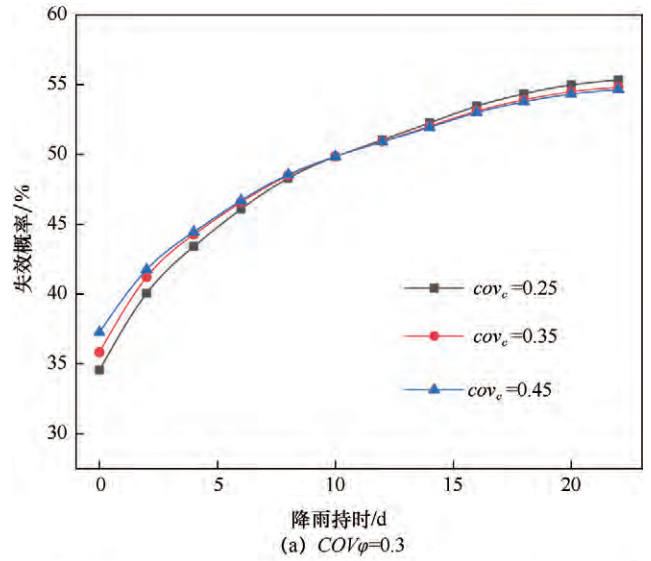


图5 抗剪参数变异系数对边坡失稳概率的影响

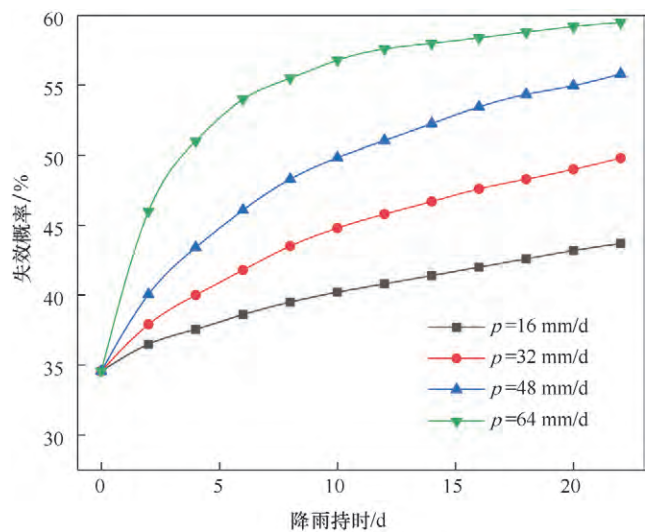


图6 降雨强度对边坡失稳概率的影响

## 4 结 论

本文基于非饱和土体理论,并结合四川省阿坝州松潘县一基岩型边坡工程实例,建立了ABAQUS降雨入渗边坡有限元强度折减模型,采用MATLAB编程二次响应面方法来进行边坡失效概率分析。分析中考虑边坡土体抗剪参数 $c$ 、 $\varphi$ 的变异性,计算成果表明:

(1) 在分析抗剪参数 $c$ 和 $\varphi$ 相关性对边坡失效概率的影响时,在相同的降雨持时下,当降雨持时小于10 d时,失效概率与抗剪参数相关系数呈正相关关系;当降雨持时大于10 d时,失效概率与抗剪参数相关系数呈负相关关系。

(2) 在分析抗剪参数 $c$ 和 $\varphi$ 的变异系数对边坡失效概率的影响时,在相同的降雨持时下,可将失效概率50%作为分界点:当失效概率小于50%时,变异系数越大,失效概率越大;当失效概率大于50%时,变异系数越大,失效概率越小;内摩擦角变异性比黏聚力变异性对边坡的失效概率影响更大。

(3) 对比确定性分析和概率分析,可以知道仅凭安全系数来判断边坡是否失稳是不太准确的,因此为了更加准确地分析边坡的抗滑稳定能力,分析时应当采用基于土体参数变异性的概率分析方法,结合两者更好地判定边坡的抗滑稳定性。

## 参考文献:

- [1] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(3): 185-208.
- [2] 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.
- [3] 张社荣, 谭尧升, 王 超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [4] 史振宁, 戚双星, 付宏渊, 等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1-10.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李典庆, 祁小辉, 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.
- [8] 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.
- [9] 郑颖人, 孔 亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 张 明. 结构可靠度分析: 方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 徐卫亚, 张志腾. 滑坡失稳破坏概率及可靠度研究[J]. 灾害学, 1995(4): 33-37.
- [12] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—94[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

(责任编辑 陈小敏)