

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.327>



融合历史降雨下斜坡稳定性观测信息的可靠度分析

刘 贤^{1,2}, 揭鸿鹄², 蒋水华^{2*}, 黎学优¹, 黄劲松²

1. 中山大学土木工程学院, 广东珠海 519082

2. 南昌大学工程建设学院, 江西南昌 330031

摘要: 降雨诱发斜坡失稳机理及可靠度分析通常忽略了现场观测信息的影响, 包括斜坡在天然条件下保持稳定或经历历史降雨后保持稳定等观测信息. 以无限长斜坡模型为例, 采用贝叶斯更新方法基于“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一现场观测信息概率反分析空间变异水力和抗剪强度参数, 基于蒙特卡洛模拟方法计算不同降雨历时下斜坡失效概率, 对比分析忽略观测信息对斜坡失效概率估计所造成的影响. 结果表明: 概率反分析通过融合历史降雨下斜坡稳定性观测信息, 可有效排除因抗剪强度参数空间变异性导致斜坡沿软弱层发生失稳的可能性, 为客观评价降雨诱发的空间变异斜坡失效概率奠定了基础. 如果忽略“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一观测信息会明显高估斜坡失效概率, 尤其在降雨初期. 本研究结果为揭示降雨诱发斜坡失稳机制提供新的视角.

关键词: 斜坡; 滑坡; 降雨入渗; 空间变异性; 概率反分析; 可靠度分析; 灾害地质.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2023)05-1865-10

收稿日期: 2022-07-15

Slope Reliability Analysis Incorporating Observation of Stability Performance under A Past Rainfall Event

Liu Xian^{1,2}, Jie Honghu², Jiang Shuihua^{2*}, Li Xueyou¹, Huang Jinsong²

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Abstract: Failure mechanism and reliability analysis of rainfall-induced slopes generally ignore the effects of field observation information, such as the observation that the slope keeps stable in natural conditions or after a historical rainfall event. In this paper, with an infinite slope model as an example, the BUS (Bayesian Updating with Subset simulation) method is adopted for the probabilistic back analysis of spatially variable hydraulic and shear strength parameters based on the field observation that the slope survived from a previous extreme rainfall event. The probabilities of slope failure under different rainfall durations are evaluated within the framework of Monte-Carlo simulation. The influence of ignoring/incorporating the field observation on the estimate of probability of slope failure is also investigated. The results indicate that the possibility of slope failing along the weak zones caused by the spatial variability of soil parameters can be effectively excluded through the probabilistic back analysis incorporating the field observation. Based on this, more realistic probability of slope failure induced by the rainfall can be produced. If the field observation that the slope survived from a previous extreme rainfall event is ignored, the probability of slope failure will be

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2021YFC3001000); 国家自然科学基金资助项目(Nos.52179103, 52222905, 41972280, 42272326); 江西省自然科学基金项目(No.20224ACB204019); 江西省水利科学院开放研究基金项目(No.2021SKSG02).

作者简介: 刘贤(1996—), 男, 博士生, 主要从事边坡可靠度更新方面的研究工作. E-mail: liux597@mail2.sysu.edu.cn

* 通讯作者: 蒋水华, E-mail: sjiaangaa@ncu.edu.cn

引用格式: 刘贤, 揭鸿鹄, 蒋水华, 黎学优, 黄劲松, 2023. 融合历史降雨下斜坡稳定性观测信息的可靠度分析. 地球科学, 48(5): 1865—1874.

Citation: Liu Xian, Jie Honghu, Jiang Shuihua, Li Xueyou, Huang Jinsong, 2023. Slope Reliability Analysis Incorporating Observation of Stability Performance under A Past Rainfall Event. *Earth Science*, 48(5): 1865—1874.

significantly overestimated, especially in the early stage of rainfall. The research outcomes provide a new perspective for interpreting the rainfall-induced slope failure mechanisms in the spatially variable soils.

Key words: slope; landslide; rainfall infiltration; spatial variability; probabilistic back analysis; reliability analysis; hazard geology.

0 引言

降雨诱发滑坡是世界上主要的地质灾害之一,特别是在热带和亚热带地区.降雨会导致基质吸力降低,地下水位抬高,降低土的抗剪强度,进而引发滑坡(郭子正等,2020).因沉积、后沉积、风化和搬运作用等因素的影响,土体参数具有明显的空间变异性,对降雨型边坡失稳机理和可靠度具有重要的影响(Li *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2015).目前,国内外学者针对降雨入渗条件下空间变异边坡失稳机理和可靠度分析开展了大量研究工作.如 Zhu *et al.* (2013)探讨了降雨入渗条件下考虑土体渗透系数空间变异性及其对土石坝孔隙水压分布和地下水位位置变化的空间影响规律.陈朝晖等(2017)研究了土体饱和渗透系数空间变异性对降雨入渗下边坡孔隙水压分布规律以及边坡局部安全系数变化的影响.肖景红等(2021)考虑了土体渗透特性的不确定性,探讨了优势渗流层对降雨型边坡稳定可靠度分析的影响.上述研究大多基于先验统计信息来模拟土体参数空间变异性.然而,仅基于先验统计信息而忽略斜坡在历史降雨事件下的稳定性观测信息,会造成计算的土体参数与工程实际存在偏差,进而会错误预测后续降雨诱发斜坡失稳机理.因而,提前利用历史降雨事件下斜坡稳定性等场地观测信息对斜坡水力和抗剪强度参数进行概率反分析,获得更为真实的土体参数统计特征,进而开展目标降雨事件下斜坡失稳机理和可靠度研究具有重要的科学意义和工程应用价值.

目前许多学者采用贝叶斯和马尔科夫链蒙特卡洛模拟(MCMC)等方法进行土体参数概率反分析及可靠度更新研究.例如 Zhang *et al.* (2018)基于孔隙水压和边坡位移监测数据,采用MCMC方法反分析边坡渗透系数和弹性模量,并进一步讨论了降雨入渗条件下非饱和边坡稳定性问题.Yang *et al.* (2018, 2019)采用MCMC方法基于不同监测方案获取的孔隙水压数据更新了空间变异边坡渗透系数.Liu and Wang (2021)采用贝叶斯方法基于历史降雨数据更新土体水力参数和抗剪强度参数,提高了对降雨型滑坡失效概率估算的准确性.遗憾的是,

是,目前很少同时研究土体水力和抗剪强度参数空间变异性对降雨诱发斜坡失稳机制的影响.事实上,土体抗剪强度参数空间变异性造成的软弱带也会诱发滑坡,忽略这一点将不可避免地会错误估计降雨作用下斜坡失效概率(蒋水华等,2020).此外,斜坡在经历多次历史降雨作用后一般仍有很大的可能性继续维持其自身稳定性.利用特定场地的斜坡经历某次历史降雨作用后保持稳定等观测信息可以更准确估计斜坡失效概率(Liu and Wang, 2021).即提前利用这一观测信息在对空间变异土体参数进行概率反分析,得到更切合客观实际的斜坡土体参数统计特征,进而基于参数后验统计信息进行目标降雨条件下斜坡可靠度分析(Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2020; 蒋水华等, 2020; Liu and Wang, 2021).这样能够更准确合理地揭示降雨入渗下斜坡失稳机理及可靠度水平(Zhang *et al.*, 2010).遗憾的是,目前这方面研究依然较少.

为此,本文以无限长斜坡模型为例,考虑土体水力和抗剪强度参数空间变异性的影响,基于“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一观测信息,提前对空间变异水力和抗剪强度参数进行概率反分析,进而修正其统计特征进行,降低对土体参数不确定性的估计,在此基础上评估目标降雨作用下斜坡失效概率.

1 斜坡参数概率反分析

贝叶斯更新方法可以利用现场观测信息推断土体参数概率分布并估计其统计特征,有效降低土体参数不确定性.由贝叶斯理论可知(Zhang *et al.*, 2010; Straub and Papaioannou, 2015; 胡金政等, 2022),土体参数 x 的后验概率密度函数(PDF)可以表示为:

$$f_x''(x) = aL(x)f_x'(x), \quad (1)$$

式中: $f_x'(x)$ 为参数 X 的先验概率密度函数; $f_x''(x)$ 为融合观测信息后得到的参数 X 后验概率密度函数; x 是随机向量 X 在原始空间内的实现值; $L(x)$ 为似然函数,表示为给定某参数时观测信息发生的可能性; a 为比例常数,用以保证在整个区间内对

$f_X''(x)$ 的积分为1, $a = 1 / \int_{-\infty}^{\infty} L(x) f_X'(x) dx$.

当似然函数与土体参数先验PDF存在共轭关系时,式(1)存在解析解.当考虑到土体参数空间变异性时,由空间随机离散导致的高维问题,通常需要对式(1)进行数值求解.本文采用由Straub and Papaioannou (2015)提出的贝叶斯更新方法(Bayesian Updating with Subset simulation, BUS),基于“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一观测信息概率反分析空间变异水力和抗剪强度参数.BUS方法通过引入似然乘子 c 构建了一个新的失效区域 Ω_X ,将复杂的贝叶斯概率反分析问题变换为等效的结构可靠度问题:

$$\Omega_X = \{p - cL(x) \leq 0\}, \quad (2)$$

式中: p 为标准均匀分布随机变量; c 是似然函数乘子,以保证所有的参数 x 均满足条件 $cL(x) \leq 1.0$.同时,式(2)亦可扩展至独立标准正态空间以便于编程求解:

$$\Omega_U = \{u_0 - \Phi^{-1}\{cL[g(u)]\} \leq 0\}, \quad (3)$$

式中: $u_0 = \Phi^{-1}(p)$, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态变量累积分布函数(CDF)的逆函数; u 是一个独立标准正态随机向量, $u = g^{-1}(x)$,其中 $g(\cdot)$ 为随机向量的等概率变换函数.

因计算方法假设和计算模型不完整性等,采用有限元、离散元或极限平衡等方法估算的斜坡安全系数 FS 与实际安全系数 y 之间存在着模型误差 ϵ .一般假定模型误差 ϵ 为服从均值 μ_ϵ ,标准差 σ_ϵ 的正态分布(Bahsan *et al.*, 2014; Depina *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2020).考虑模型误差 ϵ 影响的 y 可通过下式计算得到(Zhang *et al.*, 2010):

$$y = FS(x) + \epsilon, \quad (4)$$

式中: $FS(x)$ 为在参数值 x 处计算的斜坡安全系数.当融合“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一观测信息时,意味着该斜坡在降雨过程中及经过降雨重分布作用后观察到的安全系数大于1.0.据此,可建立对应的似然函数 $L(x)$ 如下:

$$L(x|y > 1.0) \propto P[\epsilon > 1.0 - FS(x)] = 1 - \Phi\left[\frac{1.0 - FS(x) - \mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon}\right], \quad (5)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态变量的CDF.一旦建立式(5)似然函数后,便可采用BUS方法数值求解式(1),获得斜坡空间变异水力和抗剪强度参数的后验分布及统计特征.在此基础上,进行后续目标降雨事件

下斜坡稳定及渗流可靠度分析.

2 降雨入渗下斜坡渗流分析

目前研究大多采用Richards方程来描述降雨入渗下斜坡渗流场变化及雨水瞬态入渗过程(Cho, 2014).基于Richard方程的一维非饱和带流动模型可表示如下(Yuan *et al.*, 2019):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial h}{\partial z} - \cos \alpha \right) k \right], \quad (6)$$

式中: k 表示土体渗透系数; α 为斜坡倾角; z 表示土体埋深; h 表示压力水头; θ 是土体含水率, $\theta \in [\theta_r, \theta_s]$,其中 θ_s 是土体饱和体积含水率, θ_r 为土体残余体积含水率.本文采用Hydrus-1D软件对式(6)所示非线性偏微分方程进行数值求解(Simunek *et al.*, 2013),得到不同降雨历时 t 下不同埋深 z 处的土体含水率 $\theta(z, t)$ 及压力水头 $h(z, t)$ 分布.然后,通过公式 $u_w(z, t) = \gamma_w h(z, t)$ 和 $\phi = u_a - u_w$ 计算得到不同降雨历时下沿埋深变化的孔隙水压 u_w 及基质吸力 ϕ 分布,其中 u_a 为孔隙气压.最后,基于获得的 ϕ 和 θ 分布进行斜坡可靠度分析.

此外,在斜坡渗流分析时需要选取合适的土水特征曲线来描述土体含水率 q 与渗透系数 k 与基质吸力 ϕ 之间的非线性函数关系.本文采用广泛应用的van Genuchten-Mualem模型,其计算表达式如下(van Genuchten, 1980):

$$S_e(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^n]^m}, \quad (7)$$

$$k = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (8)$$

式中: k_s 为土体饱和渗透系数; $S_e(\psi)$ 为土体相对含水率; a, n, m 为水力模型参数, $m = 1 - 1/n$.

3 降雨入渗下斜坡可靠度分析

降雨诱发滑坡通常是浅层滑坡,滑坡深度一般为1~3 m,滑裂面一般平行于坡面,并且滑裂面长度远远大于滑裂面深度(Ray *et al.*, 2010; 罗渝等, 2014; 唐扬等, 2017).鉴于这一特点,通常采用无限长斜坡模型来评价降雨入渗下斜坡稳定性,如图1所示.基于极限平衡方法和莫尔-库仑破坏准则,无限长斜坡安全系数计算表达式如下(Cho, 2014):

$$FS = \frac{c' + [(\sigma_n - u_a) - \sigma_s] \tan \varphi'}{W \sin \alpha \cos \alpha}, \quad (9)$$

式中: c' 和 φ' 分别为有效黏聚力和内摩擦角; W 为单

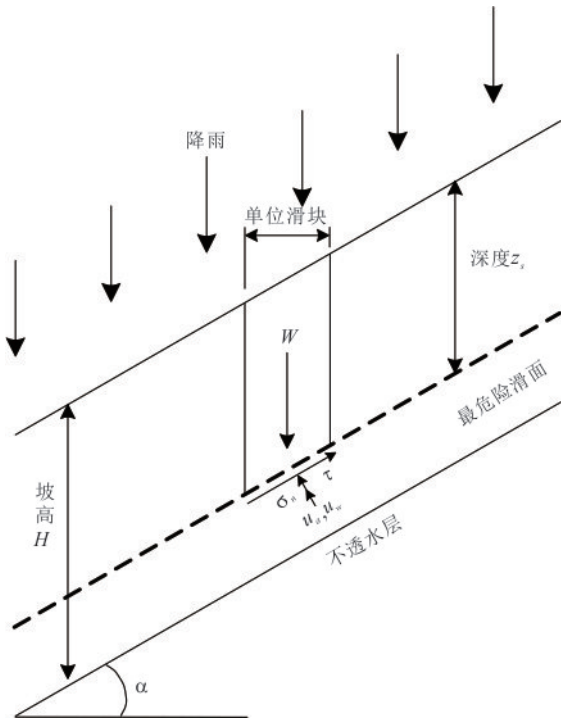


图 1 无限长斜坡模型

Fig. 1 The infinite slope model

位土块的总重量(图 1); σ_n 为因土体自重导致的总应力, $\sigma_n = \gamma_t z_s \cos^2 \alpha$, 其中 γ_t 是土体有效重度, z_s 为所计算的滑裂面深度; $\sigma_n - u_a$ 是单位土体底部的净法向力; σ_s 为用来定义广义有效应力的吸应力, 计算表达式为(Cho, 2014).

$$\sigma_s = \begin{cases} -S_e \psi, & u_w < 0, \\ u_w, & u_w \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

此外, 因降雨入渗引起的土体含水率变化也会导致土体单位重量发生变化, 因此需要对潜在滑动面以上的土重进行积分, 得到单位土块总重量 W 为(Cho, 2014):

$$W = \int_0^{z_s} \gamma_t dz = \int_0^{z_s} [\gamma_d + \theta(z) \gamma_w] dz, \quad (11)$$

式中: γ_d 为土体的干重度.

值得注意的是, 一旦考虑了土体抗剪强

度参数空间变异性, 斜坡滑动面位置存在着不确定性(蒋水华等, 2020). 本文为确定斜坡安全系数 FS 和最危险滑动面, 首先沿埋深方向将无限长斜坡划分为 D/l 个随机场单元 (D 为无限长斜坡深度, l 为随机场单元尺寸); 再将 D/l 个随机场单元底部和湿润锋分别视作潜在滑动面, 共有 $D/l+1$ 个潜在滑动面, 对于每一组随机参数输入, 采用式(9)可以计算得到 $(D/l+1)$ 组安全系数 FS ; 将其中最小的安全系数视作该斜坡 FS , 所对应的潜在滑动面便是该斜坡最危险滑动面. 最后, 采用蒙特卡洛模拟方法(MCS)计算不同降雨历时 t 下斜坡失效概率如下:

$$p_f(t) = \frac{1}{N_{sim}} \sum_{i=1}^{N_{sim}} I[FS(x^i, t) + \epsilon^i < 1.0], \quad (12)$$

式中: N_{sim} 为 MCS 抽样次数; $x^i = (k, c', \varphi')^T$ 为第 i 组土体水力和抗剪强度参数随机场实现值; ϵ^i 为第 i 组模型误差值; $I(\cdot)$ 为指示性函数, 若 FS 小于 1.0, $I(\cdot)$ 为 1, 否则 $I(\cdot)$ 为 0. 综上, 本文融合历史降雨下斜坡稳定性观测信息的斜坡可靠度计算流程如图 2 所示.

4 案例分析

下面以图 1 无限长斜坡模型为例, 首先融合“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一现场观测信息概率反分析土体空间变异水力和抗剪强度参数及其统计特征. 然后, 进行目标降雨事件下斜坡渗流稳定可靠度分析. 同时, 由文献(Wang *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2022; Guardiani *et al.*, 2022)可知, SWCC 模型参数 a 和 n 对边坡失效概率的影响较小. 为提高计算效率, 本文将其视作确定性参数. 根据文献(Liu and Wang, 2021), 斜坡土体参数取值见表 1, 斜坡倾角为 35° , 斜坡坡高 H 为 2 m, 下边界为不透水基岩.

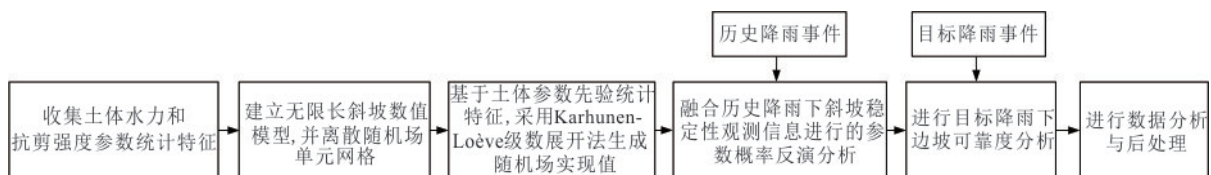


图 2 提出方法计算流程

Fig. 2 Flow chart for the implementation of the proposed approach

表 1 土体参数取值
Table 1 Values of soil parameters

计算参数	取值	计算参数	取值
饱和渗透系数 k_s	7.2 mm/h	初始基质吸力	10 kPa
饱和含水率 θ_s	46.9%	残余含水率 θ_r	10.6%
水力参数 a	0.943 m	水力参数 n	1.395
有效内摩擦角 φ'	32°	有效黏聚力 c'	5 kPa
土体干重度 γ_d	16 kN/m ³	水的重度 γ_w	9.8 kN/m ³

4.1 斜坡水力及抗剪强度参数概率反分析

接着,基于表 1 中参数先验信息进行历史降雨事件下斜坡稳定性分析,该历史降雨事件的降雨历时数据选自 Liu and Wang(2021),如图 3 所示.由图 3 可知,降雨强度随时间呈现非均匀分布,累积降雨量约为 220 mm.考虑到降雨入渗后雨水在斜坡内部的重分布过程,本文取计算时间为 240 h (10 d).图 4 给出了该降雨事件下斜坡孔隙水压沿埋深方向的分布情况.随着雨水逐渐渗入斜坡内部,坡内孔隙水压 u_w 沿埋深的分布开始发生变化,坡面土体率先达到饱和状态.降雨在第 18 h 结束后,雨水重分布过程开始,雨水逐渐渗入斜坡直至到达不透水层.在计算时间为 150 h 时,孔隙水压变化基本上趋于稳定.在此基础上,采用式(9)计算边坡安全系数,图 5 给出了该历史降雨事件下斜坡安全系数随时间的变化关系曲线.由图 4 和图 5 可知,在 240 h 时降雨已充分入渗,并且雨水最终集聚在不透水层处,斜坡孔隙水压沿埋深分布以及安全系数随时间变化均趋于收敛,变化很小.

为定量描述土体水力参数和抗剪强度参数(k_s 、 c' 和 φ')的空间变异性,本文沿埋深方向将无限长斜坡划分为 40 个随机场单元,随机场单元尺寸为 0.05 m.

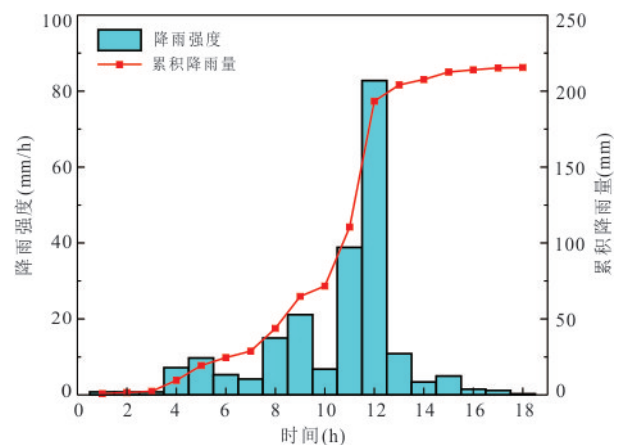


图 3 历史降雨事件的降雨历时数据
Fig. 3 Rainfall duration data of the past rainfall event

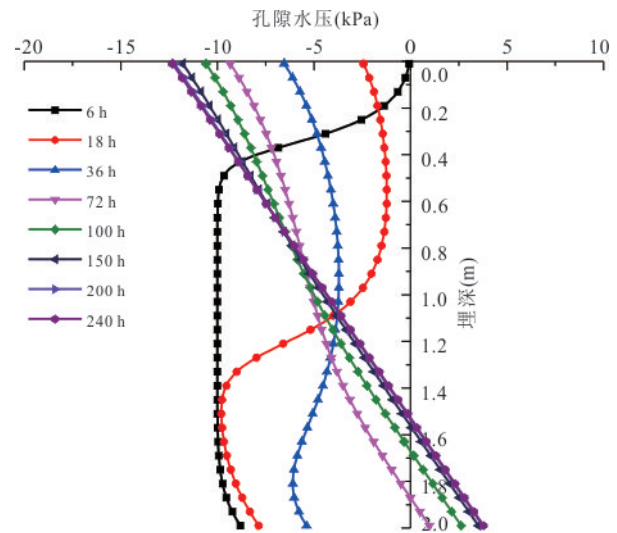


图 4 历史降雨事件下斜坡孔隙水压力沿埋深分布
Fig. 4 Comparison of the pore pressure distributions of the depth under the past rainfall event

选用光滑性好、需要离散的随机变量数目较少的高斯型自相关函数模拟土体参数的自相关性,其中垂直方向自相关距离取 0.5 m(蒋水华等,2020).根据文献(Ray *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; Liu and Wang, 2021), k_s 、 c' 和 φ' 概率分布均选用对数正态分布以保证参数取值不为负值,变异系数分别取 0.6、0.3 和 0.2, k_s 、 c' 和 φ' 先验均值分别为 7.2 mm/h、5 kPa 和 32°(见表 1).在此基础上,采用 Karhunen-Loève(KL)级数展开方法基于参数先验统计特征生成参数随机场实现值.对于每个参数随机场,KL 级数展开项数取为 5 时可满足计算精度要求.接着,将所有参数随机场实现值赋给对应的斜坡随机场单元.然后为保证计算精度,采用 10 万次 MCS 方法计算历史降雨事件下斜坡失效概率.图 6 给出了历史降雨事件下斜坡失效概率随时间的变化关系曲线.由图 6 可知,在降雨重分布作用下,斜坡失效概率由天然状态下的 5.2% 增加到 45%,至 240 h 基本达到收敛.

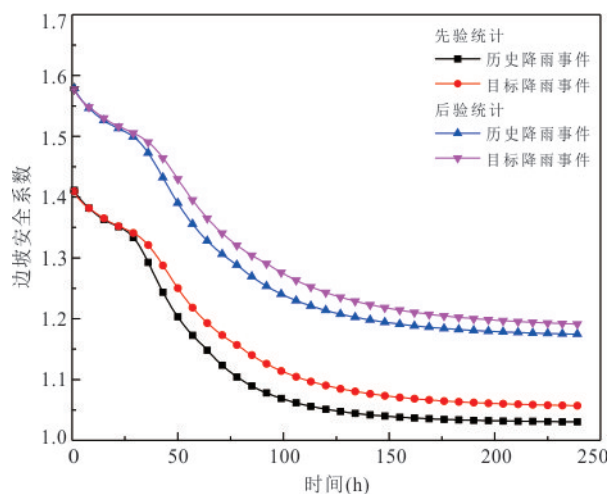


图 5 确定性斜坡安全系数随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of the factor of safety with rainfall durations

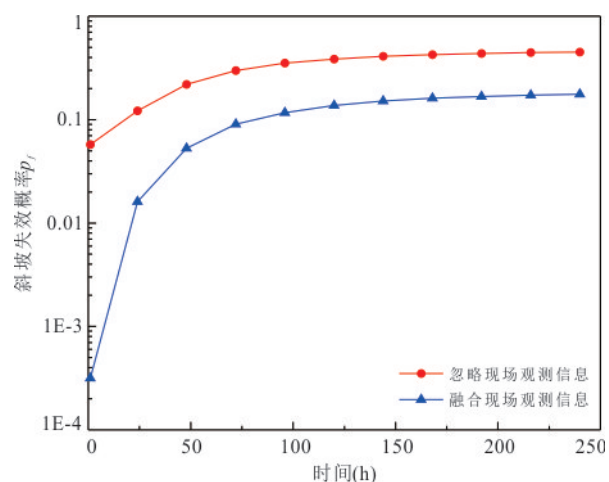


图 6 历史降雨事件下斜坡失效概率随降雨历时变化曲线

Fig. 6 Variation of the probability of slope failure with the rainfall durations under the past rainfall event

然后,融合“斜坡经历图 3 历史降雨事件后仍保持稳定”这一观测信息构建似然函数,采用 BUS 方法概率反分析空间变异土体参数(k_s 、

c' 和 φ').其中子集模拟每层样本数 N_l 取 2 000,条件概率 p_0 取 0.1,重复进行 10 次独立的贝叶斯分析并取平均值作为最终的计算结果.假设式(9)中模型误差 e 服从均值 $\mu_e=0$,标准差 $\sigma_e=0.05$ 的正态分布(Depina *et al.*, 2020).

图 7 和图 8 分别比较了 k_s 、 c' 和 φ' 的先验和后验均值与变异系数(COV)沿埋深方向的分布.由图 7 和图 8 可知, k_s 、 c' 和 φ' 的均值与 COV 沿埋深均发生了明显变化,表明随机场由平稳随机场已被更新为非平稳随机场. c' 和 φ' 的后验均值较先验均值大,尤其是在靠近不透水基岩处,而 k_s 的后验均值较先验均值小,尤其是在靠近地面处.同时融合“斜坡经历该历史降雨事件后仍保持稳定”观测信息后斜坡 FS 整体增大(图 5),这恰好反映了斜坡安全系数与 c' 和 φ' 之间呈正相关关系,与 k_s 之间呈负相关关系.图 5 也给出了历史降雨事件下基于参数后验均值计算的 FS 随时间的变化关系曲线.不难发现在任意降雨时刻,由参数后验均值计算的斜坡 FS 均大于由参数先验均值计算的 FS.另外由图 8 可知, k_s 、 c' 和 φ' 的后验 COV 基本上均小于对应的先验 COV (0.6、0.3 和 0.2),表明采用 BUS 方法融合观测信息进行参数概率反分析,可有效降低对参数不确定性的估计.

为说明采用 BUS 方法进行参数概率反演分析的有效性,图 9 比较了采用 BUS 方法和 DREAM_zs 方法(仇文岗等,2022)计算的 $z=1.975$ m 处 k_s 、 c' 和 φ' 的先验与后验 PDF 和 CDF 曲线.由图 9 可知,采用 BUS 和 DREAM_zs 方法计算的三参数后验 PDF 和 CDF 曲线均非常吻合,表明采用 BUS 方法($N_l=2$ 000)能够有效进行空间变异参数概率反演分析.由图 9 还可知,采用 BUS 方法进行参数概率反分析时,随着每层子集模拟样本数的增加,计算

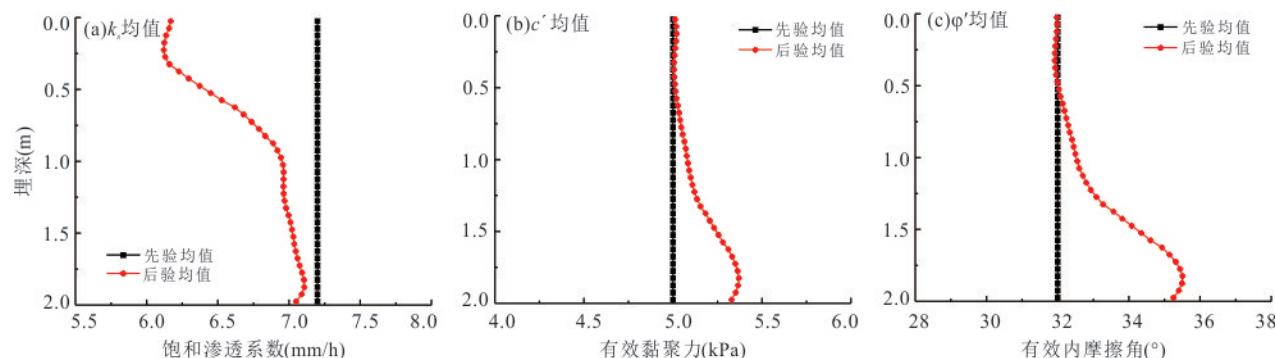


图 7 沿垂直方向土体参数先验与后验均值比较

Fig. 7 Comparison of the prior and posterior mean values of soil parameters along the depth

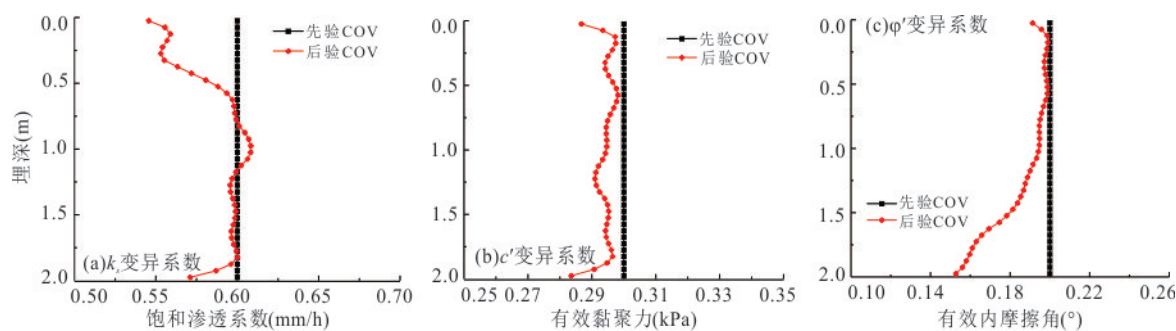


图8 沿垂直方向土体参数先验与后验变异系数比较

Fig. 8 Comparison of the prior and posterior COVs of soil parameters along the depth

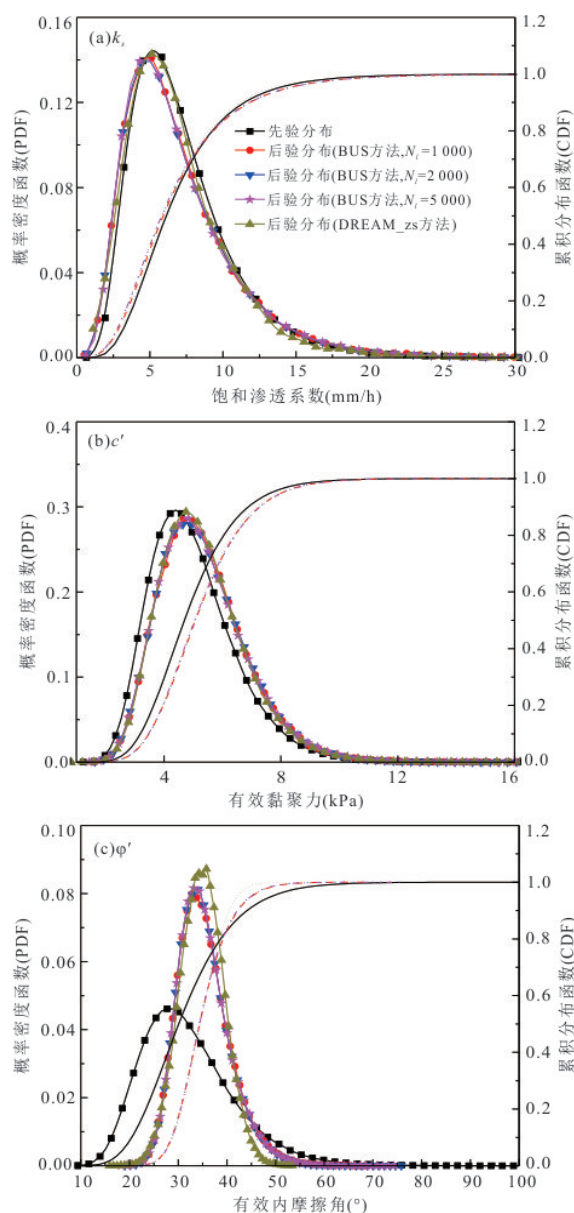


图9 参数先验与后验 PDF 和 CDF 曲线的比较 (\$z = 1.975\$ m)

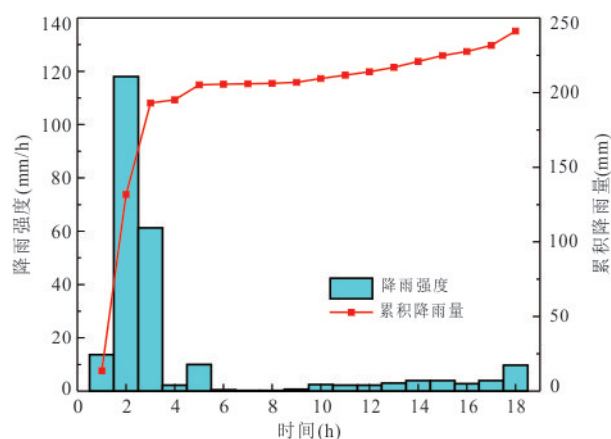
Fig. 9 Comparison of the prior and posterior probability density functions and cumulative distribution functions of soil parameters at $z = 1.975$ m

图10 目标降雨事件的降雨历时数据

Fig. 10 Rainfall duration data of the target rainfall event

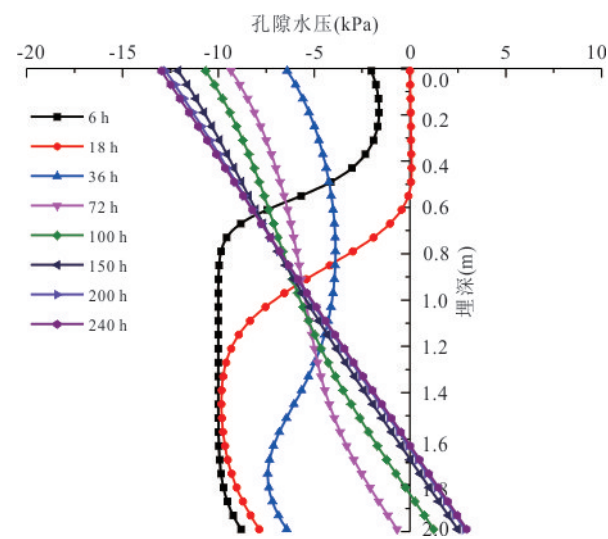


图11 目标降雨事件下孔隙水压力沿埋深分布

Fig. 11 Comparison of the pore pressure distributions of the depth under the target rainfall event

的参数后验 PDF 和 CDF 曲线逐渐收敛.为兼顾计算精度和效率要求,本文取 $N_i = 2\ 000$ 进行 10 次独立的贝叶斯分析,共需要抽样 107 620 次.此外发现,融合观测信息后, k_s 和 c' 的 PDF 和

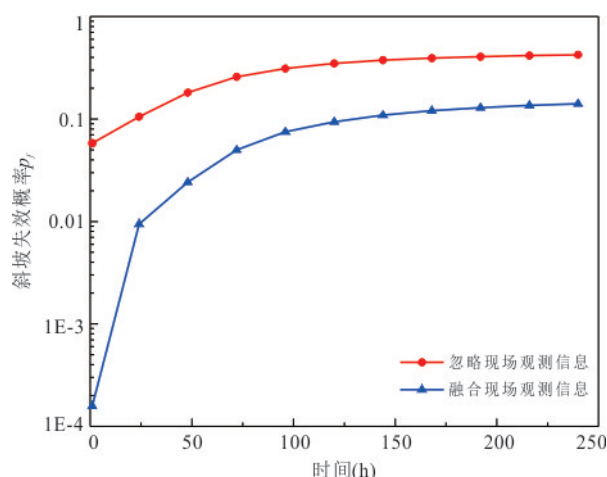


图 12 目标降雨事件下斜坡失效概率随时间的变化曲线

Fig.12 Variation of the probability of slope failure with the time under the target rainfall event

CDF 分布变化明显小于 φ' 的变化,表明 φ' 对该斜坡稳定性的影响更大.图 6 给出了基于 BUS 方法 ($N_t = 2\,000$) 计算的 107 620 组后验样本,计算的历史降雨作用下斜坡失效概率随时间的变化关系曲线.由图 6 可知,忽略“斜坡经历图 3 历史降雨事件后仍保持稳定”这一观测信息可能会高估斜坡失效概率 2 个数量级以上.

4.2 目标降雨事件下降雨斜坡可靠度分析

本节基于 4.1 节获得的土体参数后验分布及统计特征,进行目标降雨事件下斜坡可靠度分析.历时 18 h 的目标降雨事件数据也选自 Liu and Wang (2021),如图 10 所示,累积降雨量为 241 mm.图 11 给出了有限元渗流分析计算的目标降雨作用下不同时刻斜坡孔隙水压沿埋深的分布.可见,图 11 中的斜坡孔隙水压沿埋深的分布规律与图 4 基本一致.基于渗流计算结果和土体参数先验和后验均值,计算的目标降雨事件下斜坡安全系数随时间的变化关系曲线也列入图 5 中用于对比.由图 5 可知,融合观测信息的目标降雨作用下斜坡安全系数最大.图 12 进一步比较了两种工况下目标降雨作用下斜坡失效概率随降雨历时的变化规律.由图 12 可知,斜坡失效概率随着降雨历时的增加而不断增大.在目标降雨刚开始时,基于土体参数后验统计特征计算的斜坡失效概率很小,为 1.58×10^{-4} ,与斜坡遭遇历史降雨事件后保持稳定的这一观测信息吻合.如果忽略该观测信息直接基于土体参数先验信息进行可靠度分析,会明显高估目标降雨作用下斜坡失效概率,尤其是在降雨初期.该研究结果

与 Christian and Baecher (2011) 和 Wai *et al.* (2016) 发现的现象“斜坡失效概率数值计算值往往大于滑坡失效概率的现场实际观测值”十分吻合.

5 结论

本文以无限长斜坡模型为例,融合“斜坡经历某次历史降雨后仍保持稳定”这一观测信息概率反分析土体空间变异水力和抗剪强度参数,在此基础上进行目标降雨事件下斜坡渗流、稳定及可靠度评估,并对比分析了忽略这一观测信息对斜坡失效概率造成的影响.主要结论如下:

(1) 通过融合斜坡稳定性观测信息概率反分析空间变异水力和抗剪强度参数,可以有效降低土体参数不确定性,排除斜坡沿因参数空间变异性引起的软弱层处发生失稳的可能性,进而更加真实地揭示降雨诱发滑坡机理.就本文算例而言,融合观测信息通过概率反分析得到的 k_s 和 c' 的概率分布变化明显小于 φ' 的概率分布变化,表明 φ' 对该斜坡稳定性的影响更大.

(2) 在融合边坡稳定性观测信息的基础上,计算的目标降雨事件下斜坡失效概率明显减小.特别是在目标降雨初期,根据土体参数后验统计信息得到的斜坡失效概率很小,为 1.58×10^{-4} ,与斜坡经历该历史降雨事件后仍保持稳定这一观测信息吻合.一旦忽略这一观测信息,会高估降雨诱发的斜坡失效概率一个数量级以上.

(3) 降雨入渗下斜坡稳定性不仅与累积降雨量有关,而且与降雨雨型也密切相关,而本文选用文献中降雨历时数据,忽略了随机降雨过程的影响.关于随机降雨对斜坡失稳机理及可靠度更新的影响有待进一步研究.

References

- Bahsan, E., Liao, H.J., Ching, J., et al., 2014. Statistics for the Calculated Safety Factors of Undrained Failure Slopes. *Engineering Geology*, 172: 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.01.005>
- Chen, Z.H., Huang, J.H., Qin, W.T., et al., 2017. Effects of the Spatial Variability of Saturated Permeability on the Slope Stability. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 40(3): 59–69 (in Chinese with English abstract).
- Cho, S. E., 2014. Probabilistic Stability Analysis of Rainfall-Induced Landslides Considering Spatial Variability of

- Permeability. *Engineering Geology*, 171: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.015>
- Christian, J.T., Baecher, G.B., 2011. Unresolved Problems in Geotechnical Risk and Reliability. *Geotechnical Risk Assessment and Management, Geotechnical Special Publication*, 224: 50–63.
- Depina, I., Oguz, E.A., Thakur, V., 2020. Novel Bayesian Framework for Calibration of Spatially Distributed Physical-Based Landslide Prediction Models. *Computers and Geotechnics*, 125: 103660. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103660>
- Guardiani, C., Soranzo, E., Wu, W., 2022. Time-Dependent Reliability Analysis of Unsaturated Slopes under Rapid Drawdown with Intelligent Surrogate Models. *Acta Geotechnica*, 17(4): 1071–1096. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01364-w>
- Guo, Z.Z., Yin, K.L., Liu, W.L., et al., 2020. Rainfall Warning of Creeping Landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir Region Based on Displacement Ratio Model. *Earth Science*, 45(2): 672–684 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J.Z., Zhang, J., Huang, H.W., et al., 2023. Value of Information Assessment and Optimization of Slope Boreholes. *Earth Science*, 48(5): 1977–1988 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S., Liu, X., Huang, J., 2022. Non-Intrusive Reliability Analysis of Unsaturated Embankment Slopes Accounting for Spatial Variabilities of Soil Hydraulic and Shear Strength Parameters. *Engineering with Computers*, 38: 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01108-6>
- Jiang, S.H., Huang, J., Qi, X.H., et al., 2020. Efficient Probabilistic back Analysis of Spatially Varying Soil Parameters for Slope Reliability Assessment. *Engineering Geology*, 271: 105597. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105597>
- Jiang, S. H., Liu, X., Huang, F. M., et al., 2020. Failure Mechanism and Reliability Analysis of Soil Slopes under Rainfall Infiltration Considering Spatial Variability of Multiple Soil Parameters. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(5): 900–907 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Q., Qi, X. H., Phoon, K. K., et al., 2014. Effect of Spatially Variable Shear Strength Parameters with Linearly Increasing Mean Trend on Reliability of Infinite Slopes. *Structural Safety*, 49: 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.005>
- Liu, X., Wang, Y., 2021. Reliability Analysis of an Existing Slope at a Specific Site Considering Rainfall Triggering Mechanism and Its Past Performance Records. *Engineering Geology*, 288: 106144. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106144>
- Luo, Y., He, S.M., He, J.C., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39(9): 1357–1363 (in Chinese with English abstract).
- Ray, R. L., Jacobs, J. M., de Alba, P., 2010. Impacts of Unsaturated Zone Soil Moisture and Groundwater Table on Slope Instability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10): 1448–1458. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000357](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000357)
- Simunek, J., van Genuchten, M.T., Sejna, M., 2013. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16, HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California.
- Straub, D., Papaioannou, I., 2015. Bayesian Updating with Structural Reliability Methods. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(3): 04014134. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000839](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000839)
- Tang, Y., Yin, K. L., Wang, Y., et al., 2017. The Landslide Rain Infiltration Based on the Improved Mein-Larson Model. *Earth Science*, 42(4): 634–640 (in Chinese with English abstract).
- van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wai, R.C.T., Lee, R.W.H., Law, R.H.C., 2016. Review of Landslides in 2016. GEO Report No. 341, Hong Kong.
- Wang, L., Wu, C., Gu, X., et al., 2020. Probabilistic Stability Analysis of Earth Dam Slope under Transient Seepage Using Multivariate Adaptive Regression Splines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6): 2763–2775. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01730-0>
- Xiao, J.H., Wang, M., Wang, C., et al., 2021. Reliability Analysis of Slope with Dominant Seepage Interlayer under Rainfall Infiltration. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(6): 193–204 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H.Q., Zhang, L., Li, D.Q., 2018. Efficient Method for Probabilistic Estimation of Spatially Varied Hydraulic Properties in a Soil Slope Based on Field Responses:

- A Bayesian Approach. *Computers and Geotechnics*, 102: 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.11.012>
- Yang, H.Q., Zhang, L., Xue, J., et al., 2019. Unsaturated Soil Slope Characterization with Karhunen-Loève and Polynomial Chaos via Bayesian Approach. *Engineering with Computers*, 35(1): 337–350. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0610-x>
- Yuan, J., Papaioannou, I., Straub, D., 2019. Probabilistic Failure Analysis of Infinite Slopes under Random Rainfall Processes and Spatially Variable Soil. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 13(1): 20–33. <https://doi.org/10.1080/17499518.2018.1489059>
- Zhang, L. L., Wu, F., Zheng, Y. F., et al., 2018. Probabilistic Calibration of a Coupled Hydro-Mechanical Slope Stability Model with Integration of Multiple Observations. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12(3): 169–182. <https://doi.org/10.1080/17499518.2018.1440317>
- Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., et al., 2010. Back Analysis of Slope Failure with Markov Chain Monte Carlo Simulation. *Computers and Geotechnics*, 37(7/8): 905–912. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.07.009>
- Zhang, W. G., Gu, X., Liu, H. L., et al., 2022. Probabilistic back Analysis of Soil Parameters and Displacement Prediction of Unsaturated Slopes Using Bayesian Updating. *Rock and Soil Mechanics*, 43(4): 1112–1122 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H., Griffiths, D.V., Fenton, G.A., et al., 2015. Undrained Failure Mechanisms of Slopes in Random Soil. *Engineering Geology*, 191: 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.009>
- Zhu, H., Zhang, Z. L., Zhang, L. L., et al., 2013. Two-Dimensional Probabilistic Infiltration Analysis with a Spatially Varying Permeability Function. *Computers and Geotechnics*, 48: 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.010>

附中文参考文献

- 陈朝晖, 黄景华, 秦文涛, 等, 2017. 饱和渗透系数空间变异性对边坡稳定性的影响. 重庆大学学报, 40(3): 59–69.
- 郭子正, 殷坤龙, 刘庆丽, 等, 2020. 基于位移比模型的三峡库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警. 地球科学, 45(2): 672–684.
- 胡金政, 张洁, 黄宏伟, 等, 2023. 边坡勘察钻孔信息价值评价及优化布置方法. 地球科学, 48(5): 1977–1988.
- 蒋水华, 刘贤, 黄发明, 等, 2020. 考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析. 岩土工程学报, 42(5): 900–907.
- 罗渝, 何思明, 何尽川, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. 地球科学, 39(9): 1357–1363.
- 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等, 2017. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型. 地球科学, 42(4): 634–640.
- 肖景红, 王敏, 王川, 等, 2021. 含优势渗流层边坡降雨入渗下的可靠度分析. 地质科技通报, 40(6): 193–204.
- 仇文岗, 顾鑫, 刘汉龙, 等, 2022. 基于贝叶斯更新的非饱和土坡参数概率反演及变形预测. 岩土力学, 43(4): 1112–1122.