

文章编号: 1007-2993(2022)03-0208-06

# 滑坡体稳定性分析方法比较

李红英 濮仕坤 谭跃虎

(陆军工程大学 国防工程学院, 江苏南京 210007)

**【摘要】** 为给雅砻江某滑坡灾害风险评估提供可靠依据, 分别采用可靠度法和强度折减法对该滑坡体进行稳定性分析。应用 GEO-SLOPE 软件, 运用基于极限平衡理论的可靠度法分析滑坡体的稳定性以及滑坡体在蓄水暴雨工况和蓄水地震工况下的失稳概率; 运用有限元强度折减法对各工况进行分析, 并通过软件计算分析得到地震烈度和安全系数之间的关系: 随着地震烈度的增加, 安全系数呈陡降趋势。对于滑坡稳定性分析, 两种方法取得了一致性结果, 基于极限平衡理论的可靠度法计算方便但有较大的局限性, 有限元强度折减法是建立在弹塑性理论基础上, 能直观反映出滑坡的变形位移和破坏过程, 更接近于工程实际情况。

**【关键词】** 滑坡; 稳定性; 可靠度; 强度折减; 安全系数

**【中图分类号】** P 642.22; TU 457

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.007

## Stability Analysis of a Landslide in Yalong River

Li Hongying Pu Shikun Tan Yuehu

(College of Defense Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**【Abstract】** In order to provide a reliable basis for landslide risk assessment, the stability of a typical landslide body was calculated and analyzed. Two different methods were used, compared and analyzed, including reliability method and strength reduction method. With the help of GEO-SLOPE software and the method of limit equilibrium theory, the stability of the landslide body was analyzed. The probability of instability of the landslide occurs under two conditions: water storage and heavy rain, water storage and earthquake. The finite element strength reduction method was used to analyze each working condition, and the relationship between seismic intensity and safety coefficient was obtained through software calculation and analysis. With the increase of seismic intensity, the safety coefficient decreases rapidly. It is convenient to calculate through limit equilibrium method but has great limitation. The finite element strength reduction method is based on the elastic-plastic theory, which can directly reflect the deformation, displacement and failure process of the landslide. This method is closer to the actual engineering situation.

**【Key words】** landslide; stability; reliability; strength reduction; safety factor

### 0 引言

在水电工程实施之初, 对潜在的滑坡地质灾害进行风险评估分析是一项重要的研究课题, 而滑坡体稳定性分析是滑坡风险分析的重要研究内容。国内外学者针对滑坡稳定分析方法进行了大量的研究, 基于可靠度理论的边坡稳定性分析得到广泛研究和应用, 近年来基于强度折减法的边坡稳定分析也日益受到重视<sup>[1-2]</sup>。

J M Duncan<sup>[3]</sup> 综述了边坡极限平衡法; 陈祖煜等发展了三维的极限平衡法并进行了可靠度分析计算研究<sup>[4-5]</sup>; 李世海等<sup>[6]</sup> 对滑坡体稳定性分析方法进行

了详细地论述和比较; 刘 宁等<sup>[7]</sup> 通过运用结构可靠度计算的优化算法, 将工程结构的危险率转化为对结构可靠度指标的计算, 将可靠度与风险结合起来。近年来, 边坡可靠度分析热点逐步转移到如何计算边坡的实效概率<sup>[8-9]</sup>, 以及如何考虑降雨和地震等荷载的影响<sup>[10-11]</sup>。强度折减法是边坡稳定性分析的另一种常用方法, 这种方法可自动搜索最危险滑动面性状<sup>[12-14]</sup>, 郑颖人等<sup>[15]</sup> 全面介绍有限元强度折减法的应用, 并比较了不同强度准则条件下该方法计算结果的差异。本文分别采用基于可靠度的滑坡体稳定性分析和基于强度折减法的滑坡体稳定性分析两种不

作者简介: 李红英, 女, 1972 年生, 汉族, 陕西商洛人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程研究。E-mail: lihongying57101@163.com

同方法,对典型滑坡体进行稳定性分析,并探讨两种分析方法的一致性和适用性,为滑坡灾害风险评价及水电站坝址比选提供可靠依据。

### 1 工程概况

拟建的卡拉水电站工程区位于雅砻江干流中游河段,工程区内滑坡发育且规模巨大,分布有多个大型滑坡体和崩塌积体,若出现边坡失稳,将造成水库淤积或河道堵塞,并危及大坝及其它枢纽建筑的安全,因此坡体稳定性是决定坝址选择的控制性因素之一。

下田滑坡体地处雅砻江右岸,呈方形展布,滑坡体近南北走向,东、西两侧均以冲沟为界,滑坡体走向长约 1100 m。前缘直抵雅砻江,高程 1925 m;后缘为坡度陡缓交界处,高程 2730 m 左右,前后缘高差约 800 m,长约 1500 m。滑坡体地形前陡后缓,总方量为  $11640.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属巨大型滑坡。滑坡体边界较为清楚,物质组成主要为碎石土层,颗粒组成以粗、巨粒为主。根据滑坡堆积物的组成结构及地形差异,将滑坡体上下游分为 A、B 两区(见图 1)。

其中 A 区前沿浅层细颗粒含量较高,存在浅层滑带,地下水活动较活跃,稳定性相对较差。

### 2 基于可靠度的滑坡体稳定性分析

边坡可靠度分析是基于极限平衡原理建立状态方程,通过安全系数求得可靠度。可靠度分析是在计算安全系数的同时考虑安全系数的标准差或变异系数,并计算出失稳概率。滑坡体失稳概率计算采用



图 1 下田滑坡体全貌图

Monte Carlo 模拟方法进行计算<sup>[16-17]</sup>,其中,单组样本对应的边坡状态函数稳定性,采用 GEO-SLOPE 商业软件中的 SLOPE/W 模块计算,稳定性计算方法选择 Morgenstern-Price 法和 Bishop 法;应用 @RISK 软件进行统计数据的随机抽样(本文随机抽样数据取 10000 组);应用 Edit And Run 自编程序实现 @RISK 和 GEO-SLOPE 程序之间的对接。计算步骤见图 2。

#### 2.1 计算模型

根据各勘探剖面在滑坡体中的位置及其代表性,稳定性计算选取 A 区 III-III' 剖面作为计算模型,计算模型见图 3。

根据滑坡体所在的位置与枢纽工程的关系,下田滑坡体稳定计算主要考虑天然、蓄水、暴雨、蓄水+暴雨、水位骤降、地震及蓄水+地震 7 种工况。引入 Bayes 推广法对滑坡体岩土参数进行优化,确定

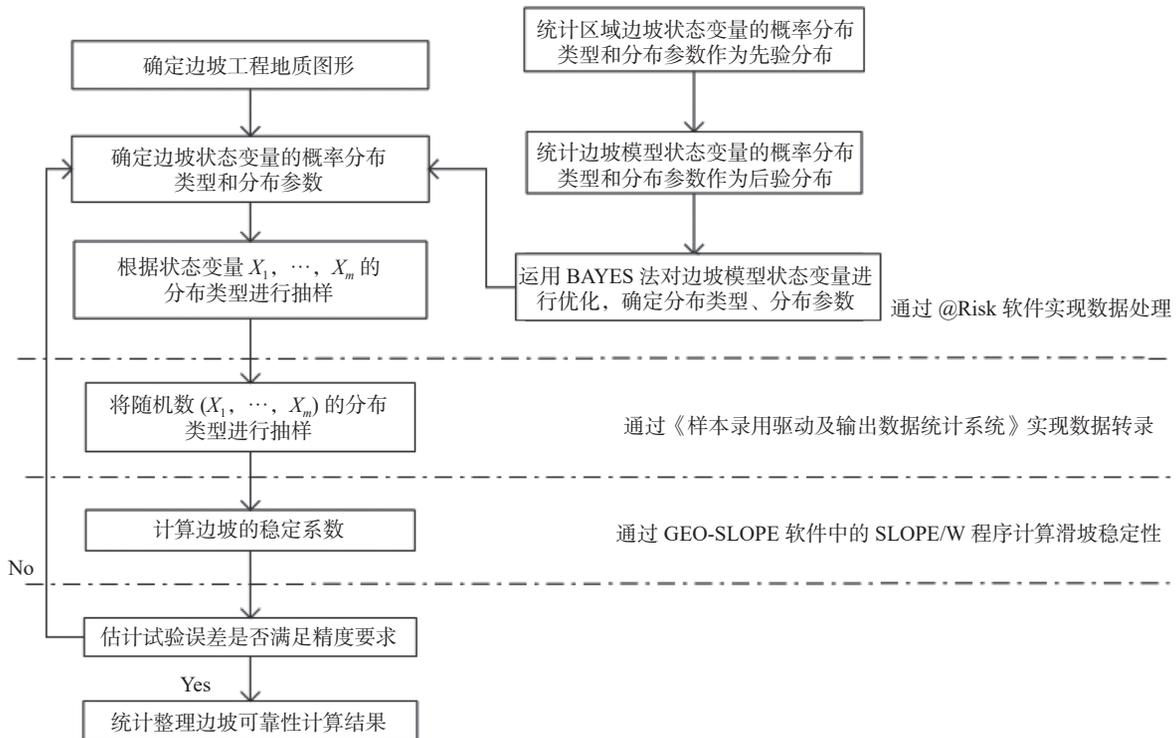


图 2 滑坡体失稳概率蒙特卡洛计算步骤

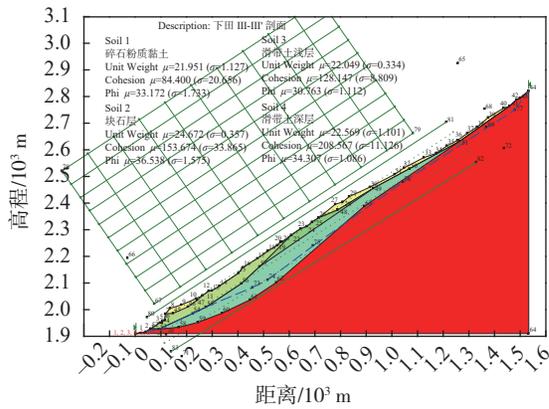


图3 下田滑坡体Ⅲ-Ⅲ'主剖面计算剖面图

滑坡体岩土参数的分布类型,滑坡体岩土参数(重度、黏聚力、内摩擦角)的分布规律满足正态分布规律。

## 2.2 滑坡体稳定性计算分析

通过计算分析,滑坡体Ⅲ-Ⅲ'剖面计算模型在各

工况下的稳定性计算结果见表1。

从表1可知,滑坡体在工况1(天然)、工况2(正常蓄水)、工况3(暴雨)、工况5(水位骤降)和工况6(地震)条件下,有较高的安全储备,失稳概率为0,但在工况4(蓄水暴雨)和工况7(蓄水地震)条件下稳定性相对较差,失稳概率分别为0.37%和7.10%,说明蓄水对坡体的稳定不利。

为了计算失稳面积,首先在10000组数据中选取安全系数小于1.0的所有安全系数,计算其对应的滑坡失稳面积的平均值,以此面积均值作为滑坡整体失稳概率所对应的失稳面积。经计算,计算剖面在工况4、工况7条件下的失稳面积分别为5194.7 m<sup>2</sup>、5743.1 m<sup>2</sup>。滑坡失稳位置与现场勘察所得定性分析结果是相符合的。

表1 下田滑坡体A区Ⅲ-Ⅲ'剖面稳定性计算结果

计算工况	计算方法	安全系数		失稳概率/%	安全系数分布/%			
		均值	方差		>1	>1.05	>1.1	>1.15
工况1天然	Bishop法	1.3426	0.0427 <sup>2</sup>	0	100	100	100	100
	M-P法	1.3392	0.0354 <sup>2</sup>	0	100	100	100	100
工况2正常蓄水	Bishop法	1.3074	0.0701 <sup>2</sup>	0	100	100	100	100
	M-P法	1.2995	0.0709 <sup>2</sup>	0	100	100	100	100
工况3暴雨	Bishop法	1.2636	0.0431 <sup>2</sup>	0	100	99.82	99.45	
	M-P法	1.2598	0.0387 <sup>2</sup>	0	100	99.89	99.71	
工况4蓄水暴雨	Bishop法	1.1925	0.0677 <sup>2</sup>	0.34	99.66	97.03	86.31	
	M-P法	1.1907	0.0662 <sup>2</sup>	0.37	99.63	97.15	85.89	
工况5水位骤降	Bishop法	1.1632	0.0423 <sup>2</sup>	0	100	100	99.41	
	M-P法	1.1651	0.0420 <sup>2</sup>	0	100	100	99.33	
工况6地震	Bishop法	1.1207	0.0385 <sup>2</sup>	0	100	96.20		
	M-P法	1.1145	0.0383 <sup>2</sup>	0	100	95.71		
工况7蓄水地震	Bishop法	1.0852	0.0402 <sup>2</sup>	7.63	92.47	77.50		
	M-P法	1.0866	0.0394 <sup>2</sup>	7.10	92.90	79.23		

## 3 基于强度折减法的滑坡体稳定性分析

为了更全面准确地分析工程区滑坡体的稳定性,采用基于强度折减法的有限元计算软件ABAQUS对同一个滑坡体进行分析计算<sup>[18-19]</sup>。ABAQUS是一种在国际上得到广泛应用的大型有限元软件,具有强大的岩土工程数值分析功能。强度折减法可以简单地用式(1)、式(2)表示:

$$c_m = \frac{c}{F_r} \quad (1)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi / F_r) \quad (2)$$

式中: $F_r$ 为强度折减系数,即在外荷载保持不变下,土体的最大抗剪强度与外荷载在边坡内产生的实际剪应力的比值; $c$ 和 $\varphi$ 为土体抗剪强度参数; $c_m$ 和 $\varphi_m$ 为维持平衡所需要的或土体实际发挥的抗剪强度参数。

假定所有土体抗剪强度的发挥一致时, 强度折减系数就相当于用极限平衡法计算的边坡整体安全系数, 因此强度折减系数与安全系数在概念上是一致的。采用强度折减法进行分析计算时, 首先假定一个强度折减系数  $F_r$ , 根据折减后的强度参数进行有限元分析, 观察是否收敛, 然后不断地增加  $F_r$ , 达到临界状态时的强度折减系数就是边坡稳定安全系数。

强度折减法的基本原理实质就是材料的  $c$ 、 $\varphi$  逐渐降低, 导致某单元的应力无法和强度配套, 或超出了屈服面, 不能承受的应力将逐渐转移到周围土体单元中去, 当出现连续滑移面(屈服点连成贯通面)之后, 土体就将失稳。而在 ABAQUS 中材料的参数是可以随温度或场变量变化的, 可以简单地实现强度参数减小的过程。

### 3.1 滑坡机理分析

对于一般的滑坡体, 可以将其大体上分为主滑段、抗滑段和牵引段三个部分(见图 4)。

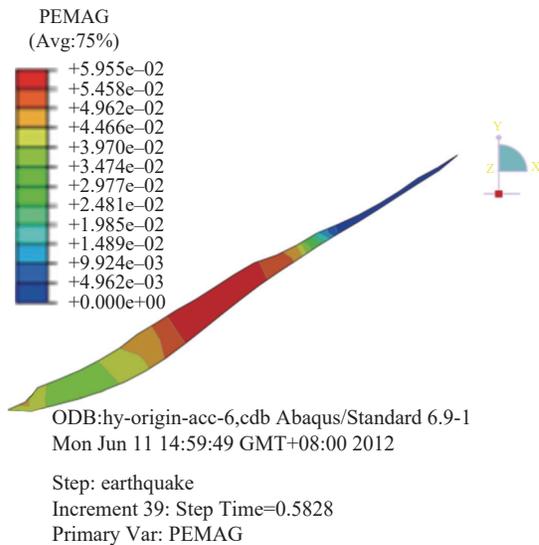


图 4 滑坡体三部分示意图

滑坡产生的力学机理可以解释为: 一定地质条件下的斜坡, 由于外界因素的影响, 主滑段首先不能保证平衡而失稳, 产生蠕动; 牵引段也因前方失去支撑力而产生张拉破坏, 破坏后的牵引段连同主滑段一起推挤向抗滑段, 使得抗滑段在被动土压力的作用下产生破坏, 待抗滑段形成新的滑动面并贯通时, 滑坡即开始了整体滑动。在这种滑坡机理基础上进行安全系数分析。

### 3.2 滑坡体稳定性计算分析

本文以滑坡体在自然工况和地震工况下的稳定性分析计算为例进行比较分析。地震工况按地震烈度进行了有限元分析(见图 5—图 7)。

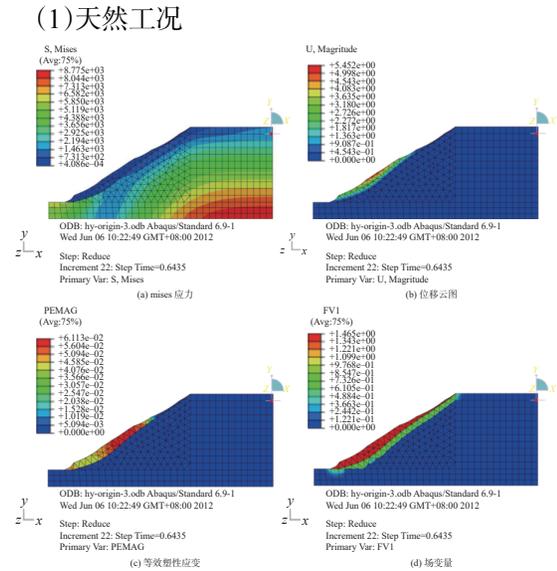


图 5 天然工况下有限元模拟图

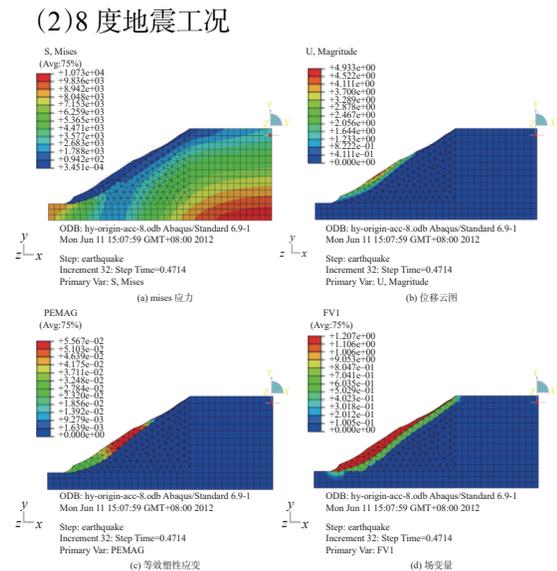


图 6 8 度地震工况下有限元模拟图

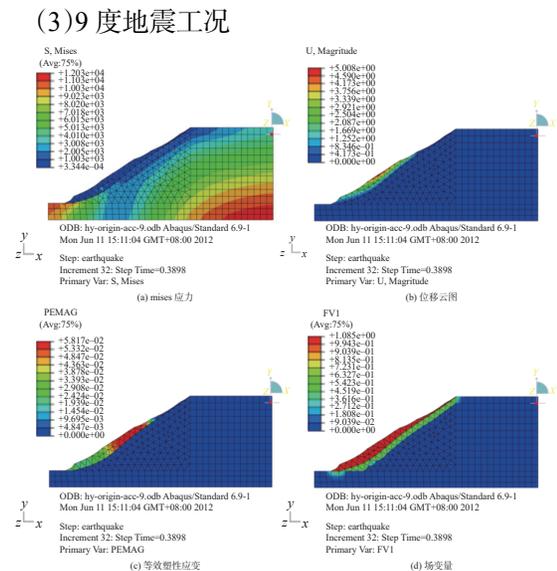


图 7 9 度地震工况下有限元模拟图

针对每种工况,采用有限元模拟分别对 mises 应力、位移、等效应变、场变量进行计算分析,得出随着地震烈度增大,应力、位移、应变等增大,稳定性降低。

根据地震烈度,水平和垂直加速度如表 2 所示,通过软件计算分析可以得到水平位移和安全系数之间的关系(见图 8)、地震烈度和安全系数之间的关系(见图 9)。

表 2 不同地震烈度所对应的水平和垂直加速度

地震烈度	水平加速度	垂直加速度
6 度	0.05g	0.033333g
7 度	0.1g	0.066667g
8 度	0.2g	0.133333g
9 度	0.4g	0.266667g

注:重力加速度 $g$ 为 $9.8\text{ m/s}^2$ 。

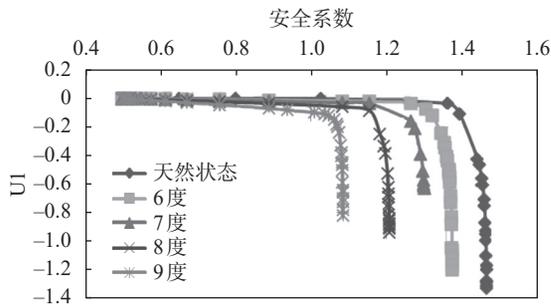


图 8 水平位移和安全系数的关系

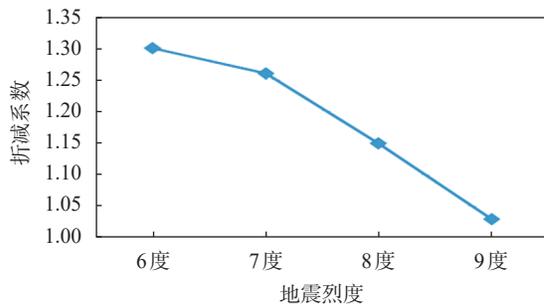


图 9 地震烈度和安全系数之间的关系

从图 9 可以看出,地震烈度和安全系数之间的相互关系及变化情况。随着地震烈度的增加,安全系数降低迅速。通过计算可得:滑坡体在天然状态、6 度、7 度、8 度、9 度地震烈度的工况下,其安全系数拐点分别为:1.36、1.30、1.26、1.15、1.03,这一结果与表 1 中工况 1 和工况 6 的计算分析结果基本一致。

如图 9 所示,随着地震烈度的不断增大,安全系数——强度折减系数不断降低,稳定性下降。一般地,最大位移越大,变形越大,滑坡体越不稳定,但从如图 10 所示的地震烈度与最大位移之间的关系曲

线上,表现出的是随着地震烈度的增大,最大位移却出现减小的趋势,究其原因可能是随着地震烈度的增加,安全系数不断减小,土体在没有到达相应的极限变形的情况下就发生了破坏。

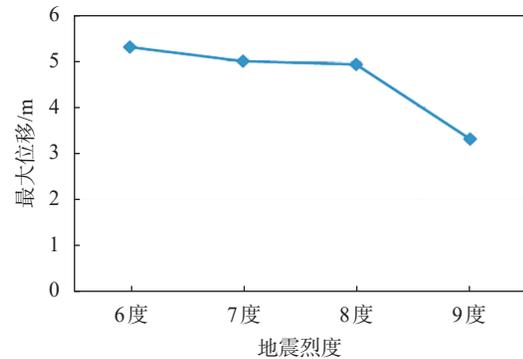


图 10 地震烈度和最大位移之间的关系

#### 4 结论

分别采用可靠度法和强度折减法对雅砻江下田滑坡体进行稳定性分析,对比计算分析结果可以得到以下结论:

(1)两种方法得出的稳定性计算分析结果趋于一致,这为全面、准确分析工程区滑坡体的稳定性提供了可靠依据。

(2)有限元强度折减法是以弹塑性理论为基础,考虑了滑坡的各项实际材料参数和边界条件,计算结果能直观反映出滑坡的变形位移和破坏过程,更接近于工程实际情况。

#### 参 考 文 献

- [1] MA J Z, ZHANG J, HUANG H W, et al. Identification of representative slip surfaces for reliability analysis of soil slopes based on shear strength reduction[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 85: 199-206.
- [2] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [3] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 22(7): 577-596.
- [4] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(5): 525-529.
- [5] 陈祖煜, 徐佳成, 孙平, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析: (一)相对安全率方法[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 148-159.
- [6] 李世海, 刘天莘, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2000, 28(S2): 3309-3324.
- [7] 刘宁, 贾超, 陈进. 基于可靠度的工程风险决策初探[J]. *岩土力学*, 2004, 25(8): 1297-1301.

- [ 8 ] 蒋水华, 祁小辉, 曹子君, 等. 基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 809-818.
- [ 9 ] 曾 鹏, 陈 语, 李天斌. 基于拟牛顿近似二阶法的岩土工程系统可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 726-733.
- [10] HUANG H W, WEN S C, ZHANG J, et al. Reliability analysis of slope stability under seismic condition during a given exposure time[J]. *Landslides*, 2018, 15( 11 ): 2303-2313.
- [11] ZHANG L L, LI J H, LI X, et al. Rainfall-induced soil slope failure: Stability analysis and probabilistic assessment[M]. CRC Press, 2018.
- [12] GAI F, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(1): 73-84.
- [13] WON J, YOU K, JEONG S, et al. Coupled effects in stability analysis of pile-slope system[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(4): 304-315.
- [14] Itasca Consulting Group. FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions [M]. Ver. 7.0. Minneapolis: Itasca, 2019.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. *中国工程科学*, 2006, 12(8): 39-61.
- [16] 李 强, 管长生, 周 武. 基于 Monte-carlo 法的滑坡稳定可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, (S1): 1674-1676.
- [17] 赵 辉, 谭跃虎, 徐 辉, 等. 雅砻江上田边坡可靠性蒙特卡洛方法综合运用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 938-945.
- [18] 杜 聪. 基于 ABAQUS 强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(2): 31-34.
- [19] 吴 标, 王志斌, 安永林, 等. 强度折减法在建筑边坡稳定性分析中的应用[J]. 土工基础, 2016, 30(4): 461-463.

收稿日期: 2020-06-10