

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003020

基于速率倒数法的滑坡时间概率预测*

赵江¹, 王梓芃², 胡金政², 马丽娜¹, 张洁²

(1.西南交通建设集团股份有限公司,云南昆明 651000; 2.同济大学地下建筑与工程系,上海 200092)

摘要:在滑坡时间预测中,基于变形监测数据的速率倒数法受到了广泛重视。在该方法的使用过程中,存在模型参数难以同时标定、难以考虑预测时间的不确定性的难题。针对上述不足,提出了一种两阶段速率倒数模型的标定方法。基于该方法可以对模型参数进行同时标定,同时可对滑坡时间进行概率预测。结合10个滑坡案例比较了不同模型假设对滑坡时间预测的影响。结果表明,考虑滑坡时间的不确定性后,预测滑坡时间与实际观测滑坡时间更为符合。考虑速率倒数模型的非线性后,拟合最优模型与实测数据的拟合度更好;但从预测效果而言,线性模型预测结果与滑坡实际发生时间符合的程度更高。

关键词:滑坡时间;速率倒数法;概率预测

中图分类号: TU42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0221-08

Probabilistic Forecast of Slope Failure Time Based on Inverse-velocity Method

ZHAO Jiang¹, WANG Zipeng², HU Jinzheng², MA Lina¹, ZHANG Jie²

(1. Southwest Transportation Construction Group Co. Ltd, Kunming 651000, China;
2. Tongji University, Department of Geotechnical Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: The monitoring data-based inverse-velocity method has drawn wide attention in slope failure forecast. There are difficulties in calibrating model parameters simultaneously and considering the uncertainty of slope failure time. To solve such problem, a two-step method for calibrating the parameters of the inverse-velocity method is introduced. Meanwhile, the probabilistic prediction is provided. Based on 10 cases of landslide, the impact of the selection of α value in the inverse-velocity method is discussed. The result shows that: (1) the predicted failure time can well accord with the actual time by considering its uncertainty with probabilistic method; (2) the linearized model can provide a more accurate forecast though the non-linearized model shows higher goodness-of-fit.

Keywords: time of slope failure; inverse-velocity method; probabilistic prediction

引言

我国西南地区深受滑坡灾害的困扰。据统计

据显示,人员伤亡30人以上或直接经济损失1000万元以上的特大型滑坡灾害事故中,有约30%位于我国西南地区^[1]。例如,1965年11月,云南省禄劝县原普福公社的烂泥沟发生特大型滑坡,事故造成

* 收稿日期:2020-03-10;修回日期:2020-06-22

基金项目:云南省交通厅科技项目(2018-26)资助

作者简介:赵江(1974—),男,高级工程师。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: ynjt_zhaojiang@163.com

通讯作者:胡金政(1994—),男,博士研究生。主要岩土工程不确定性研究。E-mail: tjce_hujz@tongji.edu.cn

444人死亡^[2];1991年9月昭通头寨滑坡造成216人死亡^[3];2013年1月云南镇雄山体滑坡事件造成46人死亡^[4]。滑坡发生时间的准确预测对于滑坡风险预警和灾害管理具有重要的意义。影响滑坡时间的因素众多,很难通过力学模型进行精确模拟,导致滑坡灾害发生的时间很难通过力学方法进行预测^[5]。另一方面,所有影响滑坡发生的因素会影响到滑坡的位移,通过分析滑坡位移—时间的关系可为滑坡预测提供宝贵的信息。鉴于这一思路,基于滑坡位移—时间曲线的滑坡时间预测方法在工程实践中得到了广泛的重视。

基于滑坡位移的时间预测方法包括速率倒数法^[6-10]、临滑切线角法^[11-13]等、灰色模型^[14-15]、Verhulst模型^[16]、基于突变理论的方法^[17]等。王延平等^[6]基于流变试验,对速率倒数法模型参数的影响因素进行了分析。G. B. Crosta等^[7]基于速率倒数法研究了岩质边坡的滑坡预警。A. Segalini等^[8]基于滑坡监测案例验证了速率倒数法的可行性。王家鼎^[11]提出了临滑切线角法的滑坡预警,许强等^[12]对切线角的测算方法进行了改进,给出了基于临滑切线角的滑坡预警判据。胡华等^[15]基于灰色模型推导出以速率为参量的滑坡时间预测方法。贺小黑等^[16]采用Verhulst生物生长模型对临滑判据进行了研究。周小平等^[17]基于突变理论,给出了基于位移数据的滑坡时间预测方法。近年来,何满潮^[18]、陶志刚等^[19]提出基于恒阻大变形锚索内力监测的滑坡失稳时间预测方法。本文的研究主要集中在速率倒数法上。

滑坡失稳并非瞬时发生,而是存在一定的发展过程,特别是对于渐变型滑坡^[20-21]。A. Singh^[22]和J. J. Emery^[23]基于岩土体材料的蠕变理论,将岩土体滑坡的过程分为应变硬化、稳态蠕变和蠕变加速三个阶段(图1)。其中,蠕变加速阶段的位移—时间曲线可为滑坡时间预测提供宝贵信息。速率倒数法假设在滑坡发生的临滑蠕变加速阶段,滑坡变形速率的对数与滑坡变形加速度的对数呈线性关系^[24-25],由此可获得^[9]:

$$\dot{\Omega} = A\ddot{\Omega}^{\alpha} \quad (1)$$

其中, Ω 为滑坡变形中监测的位移,上标点代表其对时间的导数; A 和 α 为需根据实际观测到的位移—时间数据进行标定的模型参数。参数 α 是决定模型非线性化程度的重要参数。当 $\alpha = 2$ 时,速率倒数

模型退化为一线性模型。基于实测数据对式(1)进行拟合,即可获得预测的滑坡时间。

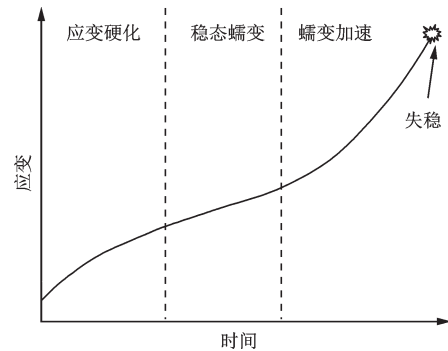


图1 滑坡蠕变发展三阶段示意

Fig.1 Three regions of creep behavior of landslide

在实际工程中,速率倒数法尚存在以下两方面的问题。首先, α 的取值还存在争议。部分学者建议采用优化求解方法确定 α ,但发现求解过程中会出现数值计算方面的难题^[26];另外一些学者则建议直接采用 $\alpha = 2$ 进行模型标定^[8,27]。对于相同的实测数据,基于不同 α 取值获得的预测滑坡时间不同,这对该方法的应用形成了困扰。其次,基于传统倒数速率法获得的预测滑坡时间为一确定性的点估计值。P. Mazzanti等^[28]指出,任何滑坡时间的预测都是真实滑坡时间的一个近似,单一点估计预测对滑坡预警和风险管理价值有限。从应用角度来讲,如能获得滑坡预测时间的可靠性,将对预警决策具有重要的作用。目前,滑坡时间预测结果不确定性方面的研究仍处于起步阶段,如T. Carlà等^[10]建议使用区间估计来代替滑坡时间的点估计,A. Manconi等^[29]使用数据重抽样方法来考虑滑坡时间预测的不确定性。如何量化滑坡时间预测结果的不确定性还有待进一步研究。

本文针对速率倒数法应用中的两个关键不足开展研究,提出基于速率倒数法的滑坡时间预测方法。首先对速率倒数法进行简要介绍;其次,对基于最大似然方法,提出了 α 的优化求解方法及失稳时间的概率预测方法;在此基础上,对提出的方法进行了比较和验证。研究成果为实际工程中滑坡的监测和预警提供了有用依据。

1 速率倒数法模型

令 t_f 代表滑坡时间, $R(t)$ 代表滑坡速率的倒数。

当滑坡临近失稳时,滑坡的速率趋近于无穷大,其速率倒数趋近于0,故速率倒数接近于0的时间点可视为滑坡时间。根据上述假设,当 $\alpha > 1$ 时,可基于式(1)获得如下关系式:

$$R = [A(\alpha - 1)(t_f - t)]^{1/(\alpha - 1)} \quad (2)$$

式(2)给出了速率倒数 R 和时间 t 的关系,其中 α 、 A 、 t_f 为 $R-t$ 曲线的参数。通过实测速率倒数和时间的关系对上述关系进行标定,即可获得 α 、 A 及 t_f 的值。式(2)中,参数 α 决定了 $R-t$ 关系的非线性化程度;当 $\alpha = 2$ 时,式(2)退化为一线性公式。实际工程中,上述模型可通过最小二乘法等方法标定,但存在优化结果对初始值敏感、 α 难以标定的困难。此外,由上述方法确定的滑坡失效时间为一点估计值,无法反映滑坡时间的不确定性。针对以上不足,本文将对 α 的取值进行讨论,并提出滑坡失效时间的概率预测方法。

2 速率倒数法模型标定方法

已有经验表明,当采用优化算法对式(2)中 A 、 t_f 及 α 同时进行标定时,标定结果对初始值有很大的依赖性;另一方面,在给定 α 的条件下,模型标定结果非常稳定。针对上述特点,本文提出一种两阶段模型标定方法:在第一阶段,对给定 α 条件下的 A 和 t_f 进行标定;在第二阶段,比较不同 α 取值条件下模型对实测数据的拟合精度,对 α 的取值提出建议。下面分别对上面两个阶段的标定方法进行介绍。

2.1 给定 α 条件下速率倒数模型标定方法

令 d_i 为 t_i 时刻观测到的速率倒数值。假设存在 n 个速率倒数观测值,令 $\mathbf{d} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 代表观测数据。图2给出了文献中某钻石矿滑坡^[30]的速率倒数观测数据。可见,受环境波动、观测误差等因素的影响,实际观测到的速率倒数和时间并非刚好落在一条光滑的曲线上。为考虑观测数据的不确定性,假定速率倒数的观测值为模型预测值叠加随机误差:

$$d_i = [A(\alpha - 1)(t_f - t_i)]^{1/(\alpha - 1)} + \varepsilon_i \quad (3)$$

其中, ε_i 为一系列均值为零、标准差为 σ 的独立同分布正态分布随机变量。令 $\theta = \{A, t_f, \sigma\}$ 。在 α 和 θ 已知的条件下,在 t_i 时刻观测到速率倒数的值为 R_{oi} 的概率为:

$$f(d_i|\theta) = \phi \left\{ \frac{d_i - [A(\alpha - 1)(t_f - t_i)]^{1/(\alpha - 1)}}{\sigma} \right\} \quad (4)$$

其中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布的概率密度函数。假设各个数据点之间统计独立,则观测到所有数据的概率为:

$$l(\theta|\mathbf{d}) = \prod_{i=1}^n \phi \left\{ \frac{d_i - [A(\alpha - 1)(t_f - t_i)]^{1/(\alpha - 1)}}{\sigma} \right\} \quad (5)$$

上述表达式即为的似然函数。根据最大似然性原理,使得式(5)取值最大的 θ 即为模型参数的最优值。实际优化过程中,式(5)中由于连乘的存在会导致似然性函数的数值绝对值很小,在优化中容易受到计算误差的影响而导致算法难以收敛。此时,可对似然函数取对数,通过对似然函数对数值取最大值而获得模型参数的最优值。对数似然函数可通过如下关系获得:

$$L(\theta) = \ln l(\theta|\mathbf{d}) \quad (6)$$

令 θ^* 代表使式(6)最大化的 θ 值,令 t_f^* 为 θ^* 中对应于 t_f 的值。基于最大似然原理, t_f^* 为滑坡时间的最优预测值。

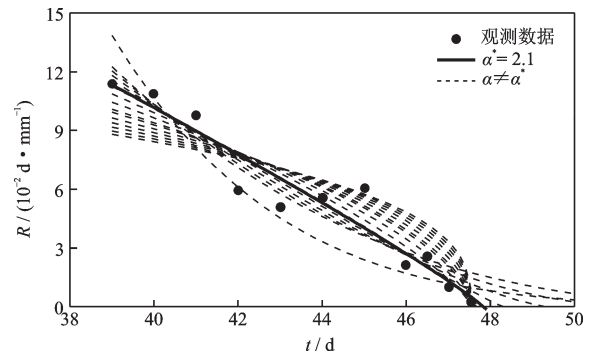


图2 Letlhakane矿滑坡速率倒数-时间拟合曲线

Fig.2 Fitted R-t curve for Letlhakane pit mine

2.2 α 的比较和选择

上文中给出了既定 α 条件下 A 和 t_f 的标定方法。在对 A 和 t_f 进行标定的过程中,同时获得了给定 α 条件下似然函数的最大值。似然函数衡量了模型对数据的拟合程度,因此不同 α 取值条件下获得的最大似然函数值可用来衡量不同 α 取值条件下速率倒数模型的拟合优度。最大似然函数值越高,对应 α 建立的速率倒数模型拟合优度越高,故可采用最大似然函数对 α 取值进行选择。基于这一思路, α 可按如下步骤进行选取:

(1)计算不同 α 取值下速率倒数模型的最大似然函数值;

(2)令 α^* 代表最大似然函数值对应的 α , α^* 即为 α 的最大似然值。

可以证明,按上述方法获得的 α^* 对应的速率倒数模型与观测数据的拟合残差最小、拟合精度最高。本文将按这一思路获得的 α 称为拟合最优 α ,由此建立的速率倒数模型称为拟合最优模型。

2.3 预测滑坡时间的概率分布

最大似然法不但可获得模型参数的最优估计值,还可获得模型参数的概率分布。基于最大似然法原理,模型参数 θ 的概率分布可采用一均值为 θ^* 、协方差为 C_θ 的多元正态分布来拟合,其中 C_θ 可按下式计算^[31-32]:

$$C_\theta = \left[-\frac{\partial^2 \ln l(\theta)}{\partial \theta \partial \theta^T} \right]^{-1} \Bigg|_{\theta = \theta^*} \quad (7)$$

C_θ 衡量了待估参数的不确定性,包括预测滑坡时间 t_f 的不确定性。令 σ_{t_f} 代表预测滑坡时间的标准差。根据最大似然法原理, t_f 的分布可用一均值为 t_f^* 、标准差为 σ_{t_f} 的正态分布进行近似,由此可获得预测滑坡时间的概率分布函数。上述方法可用于不同 α 取值条件下滑坡时间的概率预测,包括 $\alpha=2$ 条件下基于线性模型的滑坡时间概率预测以及 $\alpha=\alpha^*$ 条件下基于拟合最优模型的滑坡时间概率预测。

如前所述,不少研究建议直接采用线性模型($\alpha=2$)进行滑坡时间预测^[8,27]。下文将分别采用拟合最优模型与线性模型对速率倒数模型进行标定和比较,在此基础上对 α 的取值方法进行分析。

3 案例分析

以Letlhakane钻石矿滑坡^[30]为例介绍本文提出方法的实施过程。Letlhakane钻石矿位于博茨瓦纳中部区,该矿为露天开采,滑坡地层由上至下主要为玄武岩、砂岩及其表面风化层。在滑坡发生前矿坑开挖深度为290 m。文献^[30]使用24小时自动位移监测系统监测,并分析了2005年3~7月间的监测数据。2005年6月9日在矿坑西侧边坡观测到裂缝,7月14日发生失稳。为了计算方便,本文选取2005年5月27日为时间原点,位移监测曲线显示此时滑坡即将进入稳定蠕变阶段,在此之前监测点的位移值很小,可忽略不计。

图2为Letlhakane钻石矿滑坡的监测数据点及

α 取不同值时对应的 $R-t$ 曲线。该滑坡的真实发生时间为 $t_{fa}=48$ d。当 α 取不同值时, $R-t$ 曲线的曲率各不相同。当 $\alpha>2$ 时, $R-t$ 曲线呈上凸趋势, $\alpha<2$ 时则下凹; $\alpha=2$ 时, $R-t$ 曲线为直线。文献^[24-25]中基于室内试验得到的 α 的推荐值为1.5~2.2。本文使用的试算范围为 $\alpha=1.05\sim 4.0$ 。图3为 α 取不同值时计算所得的似然函数最大值 $l(\theta^*)$ 。可以看出,当 $\alpha=2.1$ 时, $l(\theta^*)$ 最大,即 $\alpha^*=2.1$ 。

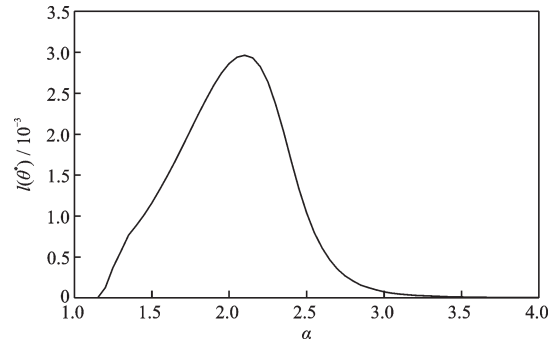


图3 不同 α 取值下的似然函数最大值

Fig.3 Maximized likelihood function values for various α values

当 $\alpha^*=2.1$ 时, A 、 t_f 和 σ 的最优参数分别为1.48、47.8 d、1.1 d,对应的 $R-t$ 曲线如图2中粗实线所示。该滑坡的实际失稳时间为 $t_{fa}=48$ d。在传统速率倒数法中将 t_f^* 视为滑坡的预测发生时间。在本例中, t_f^* 和实际滑坡时间有较大的差距。基于式(7)可得滑坡时间的标准差为 $\sigma_{t_f}=0.39$ d。图4(a)、4(b)分别给出了滑坡失效时间的概率密度函数和累计概率密度函数。由图4(a)可知,滑坡最有可能发生的时间为47.8 d,但其95%置信区间为[47.1 d, 48.6 d]。滑坡发生的真实时间位于上述置信区间之内。由图4(b)可以看出,当 $t=48$ d时,滑坡发生概率约为67%,也说明此时滑坡有较大的发生概率。

作为比较,本文还采用线性模型($\alpha=2$)对图2中数据进行了标定。基于线性模型,滑坡时间服从均值为 $t_f^*=48.1$ d,标准差为 $\sigma_{t_f}=0.46$ d的概率分布。本例中,基于线性模型获得的 t_f^* 与滑坡实际发生时间更接近。由图4(a)可知,滑坡发生的最有可能时间为48.1 d,其对应的95%置信区间为[47.2 d, 49 d],真实时间也位于该置信区间之内。本例中拟合最优模型和线性模型均能合理地预测滑坡时间。

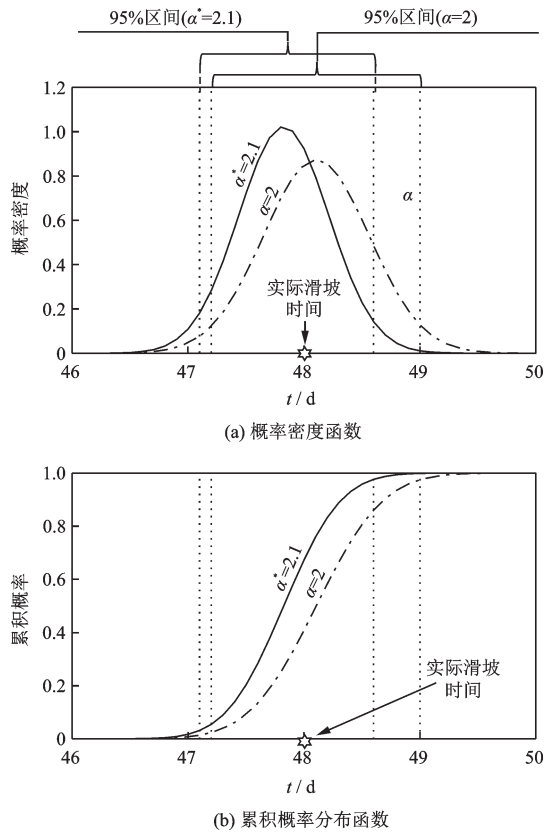


图4 滑坡时间的概率分布

Fig.4 Probabilistic distribution of slope failure time

4 模型的比较和验证

为进一步验证方法的可靠性,搜集了文献中的另外9个滑坡的监测数据,采用本文方法对其进行了分析。首先采用拟合最优模型对上述滑坡的失稳时间进行了预测。Letlhakane 矿滑坡及这9个滑坡的失稳时间、拟合最优 α 值以及对应的95%置信区间分析结果见表1。如前所述,上述不确定性主要由观测数据的不确定性造成。由表1可知,这10个滑坡的拟合最优 α 值分别位于1.3~2.4,其中鸡鸣寺滑坡和La Saxe滑坡的最优 α 值为2,即此时最优拟合模型也是线性模型。

传统速率倒数模型中常假定 t_f 的均值 t_f^* 为滑坡时间的预测值。图5展示了各个滑坡的预测 t_f^* 值与实际滑坡时间 t_{fa} 之间的误差绝对值,图中水平虚线表示预测误差绝对值为1 d的界限。可以看出,仅1号、4号、5号、7号、8号的 t_f 均值与实际滑坡时间的误差在1 d以内,其他滑坡的时间预测存在较大误差,其中10号滑坡预测误差达46.8 d。

表1 10个滑坡的时间预测结果

Table 1 Failure time predictions of 10 slopes

序号	滑坡名称	实际失稳时间 t_{fa}/d	拟合最优 α^* 值	$\alpha = \alpha^*$			$\alpha = 2$		
				均值 t_f^*/d	标准差 σ_{t_f}/d	95% 置信区间/d	均值 t_f^*/d	标准差 σ_{t_f}/d	95% 置信区间/d
1	Letlhakane 矿 ^[30]	48	2.1	47.8	0.39	[47.1, 48.6]	48.1	0.46	[47.2, 49.0]
2	金川露天矿 ^[33]	814	1.6	847.8	32.2	[784, 910.9]	813.6	23.9	[766.7, 860.5]
3	茂县滑坡 ^[34]	989	2.3	985.2	6.6	[972.3, 998.0]	992.0	27.9	[937.2, 1 046.7]
4	Ca'Lita ^[35]	140	1.3	140.0	25.6	[899.9, 190.1]	140.0	8.1	[124.1, 155.9]
5	Agoyama ^[36]	55.06	1.9	55.0	0.4	[54.2, 55.7]	54.5	1.02	[52.5, 56.5]
6	大冶铁矿 ^[37]	1 282	2.4	1 267.5	0.9	[1 265.6, 1 269.3]	1 274.0	2.9	[1 268.3, 1 279.7]
7	鸡鸣寺滑坡 ^[37]	432	2.0	431.4	0.8	[429.8, 432.9]	431.4	0.8	[429.8, 433.0]
8	La Saxe ^[29]	21	2.0	20.9	4.3	[12.5, 29.2]	20.9	4.3	[12.5, 29.2]
9	Ruinon ^[38]	193	1.5	200.7	11.4	[178.4, 223.0]	192.2	7.7	[177.0, 207.3]
10	Cowden ^[39]	163	1.3	209.8	11.5	[187.2, 232.3]	166.8	7.5	[152.0, 181.5]

本文提出的方法不但能获得滑坡时间的均值,还能获得滑坡时间的不确定性。图6对比了各个滑坡预测 t_f 值的标准差。滑坡预测时间的标准差在0.4~32.2 d,表明对于不同的滑坡在滑坡时间预测上有不同程度的不确定性。由表1可以看出,

考虑滑坡时间的不确定性后,除6号滑坡和10号滑坡外,其他滑坡的实际失稳时间均位于预测滑坡时间的95%置信区间之内。本文提出的概率预测方法获得滑坡预测时间与实际观测滑坡时间更为一致。

为验证线性模型的可靠性,表1中同时给出了 $\alpha=2$ 条件下滑坡时间的预测结果。如前所述,传统速率倒数模型将本文方法获得的均值作为滑坡时间的预测值。由图5可知,表1中1~9号滑坡的预测滑坡时间均值与实际滑坡时间的差距在1 d以内,10号滑坡预测时间均值与实际滑坡时间的差距最大,为3.8 d。相比而言,基于线性模型获得的预测滑坡时间均值与实际滑坡时间更为接近。由图6可知,不同滑坡使用线性模型预测的标准差在0.46~27.9 d,表明基于线性模型滑坡预测时间也具有显著的不确定性。线性模型预测的标准差与基于拟合最优模型的标准差一般不相同。总体来看,二者具有一定的相关性,即线性模型预测的标准差较小时,基于最大似然方法确定 α 值的模型的标准差也可能比较小,反之亦然。从概率预测角度来看,采用线性模型时10个滑坡中仅有6号滑坡位于线性模型获得的滑坡时间95%置信区间外。

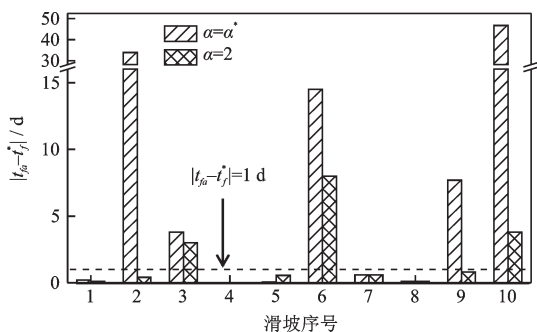


图5 实际滑坡时间 t_{fa} 与预测失稳时间 t_f^* 的偏差

Fig.5 Difference between the actual failure time t_{fa} and the predicted failure time t_f^*

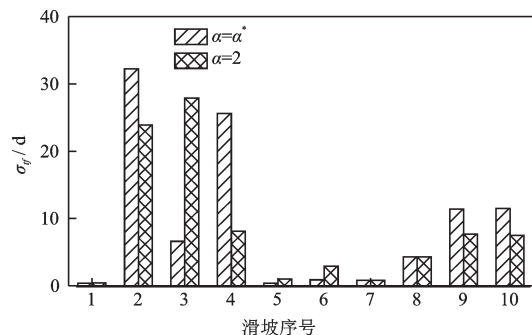


图6 预测失稳时间 t_f^* 的标准差 σ_f

Fig.6 Standard deviation of the predicted failure time t_f^*

以上分析可以看出,速率倒数法预测的滑坡时间在不同案例中有不同的精度,而传统速率倒数法无法考虑预测时间的不确定性。基于本文提出的概率方法,预测滑坡时间与实际滑坡时间有更好的

一致性。相比而言,拟合最优模型的预测效果并不优于线性速率倒数模型。上述现象说明,似然函数主要衡量了模型与已有监测数据的拟合效果,但拟合精度高的模型其预测效果并不一定更优。因此,实际工程中采用线性速率倒数模型进行滑坡时间预测有很强的合理性。

5 结 语

针对现有速率倒数模型的不足,提出了一种两阶段速率倒数模型的标定方法,给出了滑坡时间的概率预测方法,结合10个滑坡案例比较了 α 取值对滑坡时间预测的影响。结果表明:(1)考虑滑坡时间的不确定性后,实际观测滑坡时间与预测滑坡时间更为一致;(2)考虑速率倒数模型的非线性后,模型与实测数据的拟合度更好。但从预测效果而言,滑坡线性模型预测结果与滑坡实际发生时间符合的程度更高。

参考文献:

- [1] 中国地质调查局地质环境监测院. 中国特大型滑坡分布图[EB/OL]. (2015-11-20) [2019-12-23].
- [2] 程先锋, 祝传兵, 齐武福, 等. 云南省禄劝县普福滑坡形成条件、发展趋势与防治对策[J]. 矿产与地质, 2015, 29(3):395-401.
Cheng X F, Zhu Ch B, Qi W F, et al. Formation conditions, development tendency and preventive measures of Pufu landslide in Luquan of Yunnan[J]. Mineral Resources and Geology, 2015, 29(3):395-401. (in Chinese)
- [3] 陈自生, 孔纪名. 1991年9月23日云南省昭通市头寨沟特大滑坡[J]. 山地研究, 1991, 9(4):265-268.
Chen Z Sh, Kong J M. A catastrophic landslide of Sept. 25, 1981 at Toushaigou of Zhaotong, Yunan Province [J]. Mountain Research, 1991, 9(4):265-268. (in Chinese)
- [4] 殷跃平. 云南镇雄特大滑坡灾害的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1):4-5.
Yin Y P. Lessons from huge landslide in Zhenxiong, Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1):4-5. (in Chinese)
- [5] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. 地质论评, 2007, 53(6):797-806.
Shi J S, Shi L, Wu Sh R. Difficulties and problematical aspects of landslide risk assessment: an overview [J].

- Geological Review, 2007, 53(6): 797-806. (in Chinese)
- [6] 王延平, 许强, 郑光, 等. 速度倒数法滑坡预警模型流变试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1606-1614.
Wang Y P, Xu Q, Zheng G, et al. A rheology experimental investigation on early warning model for landslide based on inverse-velocity method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1606-1614. (in Chinese)
- [7] Crosta G B, Agliardi F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 176-191.
- [8] Segalini A, Valletta A, Carri A. Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: a generalized criterion [J]. Engineering Geology, 2018, 245: 72-80.
- [9] Fukuzono T. New methods for predicting the failure time of a slope [C]//Proceedings of the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo: Tokyo University Press, 1985: 145-150.
- [10] Carlà T, Macciotta R, Hendry M, et al. Displacement of a landslide retaining wall and application of an enhanced failure forecasting approach [J]. Landslides, 2018, 15(3): 489-505.
- [11] 王家鼎. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 1999.
Wang J D. The study on typical high-speed landslide in crowds using the systematic analysis in engineering geology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1999. (in Chinese)
- [12] 许强, 曾裕平, 钱降澎, 等. 一种改进的切线角就对应的滑坡预警判据 [J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501-505.
Xu Q, Zeng Y P, Qian J P, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warming criteria [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 501-505. (in Chinese)
- [13] 王珣, 李刚, 刘勇, 等. 基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3670-3679.
Wang X, Li G, Liu Y, et al. Critical sliding prediction criterion of landslide based on constant deformation rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3670-3679. (in Chinese)
- [14] 殷坤龙, 晏同珍. 滑坡预测及相关模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 1-8.
Yin K L, Yan T Zh. Landslide prediction and relevant models [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 胡华, 谢金华. 以速率为参量的GM(1,1)滑坡时间预报模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 70-76.
Hu H, Xie J H. GM (1,1) Model of landslide time prediction based on velocity parameters [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institution, 2018, 35(10): 70-76. (in Chinese)
- [16] 贺小黑, 王思敬, 肖锐铨, 等. Verhulst滑坡预测预报模型的改进及其应用 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增1): 355-364.
He X H, Wang S J, Xiao R H, et al. Improvement of Verhulst forecast model of landslide and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 1): 355-364. (in Chinese)
- [17] 周小平, 钱七虎, 张永兴, 等. 基于突变理论的滑坡时间预测模型 [J]. 工程力学, 2011, 28(2): 165-174.
Zhou X P, Qian Q H, Zhang Y X, et al. Time prediction model of landslide based on catastrophe theory [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 165-174. (in Chinese)
- [18] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090.
He M Ch. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslide sand its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090. (in Chinese)
- [19] 陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等. 基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用 [J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 3032-3040.
Tao Zh G, Li H P, Sun G L, et al. Development of monitoring and early warning system for landslides based on constant resistance and large deformation anchor cable and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 3032-3040. (in Chinese)
- [20] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 145-151.
Xu Q. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 145-151. (in Chinese)
- [21] 黄晓虎, 雷德鑫, 郭飞, 等. 基于变形监测的运动型滑坡临灾预警系统研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 802-808.
Huang X H, Lei D X, Guo F, et al. Early warning model of sports landslide based on deformation monitoring [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 802-808. (in Chinese)
- [22] Singh A. Creep phenomena in soils [D]. Berkeley: Uni-

- versity of California, Berkeley, 1966.
- [23] Emery J J. Simulation of slope creep [C] // Developments in Geotechnical Engineering, Amsterdam: Elsevier, 1978: 669-691.
- [24] Voight B. A method for prediction of volcanic eruption [J]. *Nature*, 1988, 332: 125-130.
- [25] Voight B. A relation to describe rate-dependent material failure [J]. *Science*, 1989, 243: 200-203.
- [26] Agliardi G B C F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 176-191.
- [27] Rose N D, Hungr O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 308-320.
- [28] Mazzanti P, Bozzano F, Cipriani I, et al. New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study [J]. *Landslides*, 2015, 12(1): 55-68.
- [29] Manconi A, Giordan D. Landslide early warning based on failure forecast models: the example of the Mt. de La Saxe rockslide, northern Italy [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15: 1639-1644.
- [30] Kayesa G. Prediction of slope failure at Letlhakane mine with the geomos slope monitoring system [C] // The South African Institute of Mining and Metallurgy, International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations, Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006: 605-622.
- [31] Gelman A, Stern H S, Carlin J B, et al. Bayesian data analysis [M]. 3rd edition. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2013: 83-88.
- [32] Juang C H, Khoshnevisan S, Zhang J. Maximum likelihood principle and its application in soil liquefaction assessment [C] // Risk and Reliability in Geotechnical Engineering, New York: CRC Press, 2015: 181-219.
- [33] 许兵, 李毓瑞. 金川露天矿上盘西区滑坡倾倒滑移复合破坏类型的研究 [C] // 中国典型滑坡. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 1986: 119-126.
- Xu B, Li Y R. Study on the compound failure type of landslide overturning and slipping in the western area of hanging wall in Jinchuan open-pit Mine [C] // Typical Landslides in China, Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, 1986: 119-126. (in Chinese)
- [34] Intrieri E, Raspini F, Fumagalli A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. *Landslides*, 2017, 15(1): 123-133.
- [35] Borgatti L, Corsini A, Barbieri M, et al. Large reactivated landslides in weak rock masses: a case study from the Northern Apennines (Italy) [J]. *Landslides*, 2006, 3(2): 115-124.
- [36] Saito M. Evidential study on forecasting occurrence of slope failure [R]. Tokyo: OYO Technical Report, 1979.
- [37] 许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1099-1106.
- Xu Q, Zeng Y P. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1099-1106. (in Chinese)
- [38] Hayashi S, Park B W, Komamura F, et al. On the forecast of time to failure of slope (II) [J]. *Landslides*, 1988, 25(3): 11-16.
- [39] Dixon N, Hill R, Kavanagh J. Acoustic emission monitoring of slope instability: development of an active waveguide system [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2003, 156(2): 83-95.

(本文责编:赵霞)