

滑坡运动距离超越概率评价及危险性区划

孙小平^{1,2}, 曾鹏^{1,2*}, 张天龙^{1,2}, 王升^{1,2}

SUN Xiaoping^{1,2}, ZENG Peng^{1,2*}, ZHANG Tianlong^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}

1.成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059

1. College of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:针对岩土体物理力学参数不确定性强、动态数值模拟方法对滑坡运动距离预测精度有限的问题,提出一种基于拉丁超立方采样法(LHS)的滑坡运动距离超越概率定量评价方法,以提高滑坡滑程预测结果的可靠性。该方法将滑坡计算参数考虑为服从某种概率分布的随机变量,使用LHS对随机变量进行分层抽样,并基于动态数值模型计算每组随机样本对应的滑坡运动距离,最后,通过构建不同运动距离阈值下的极限状态函数计算运动距离超越某一给定位置的概率。应用该方法对大堡子滑坡运动距离进行评价,得到该滑坡运动距离在95%置信水平下的置信区间为[196 m, 302 m];并根据运动距离-超越概率图,提出以50%、10%、1%和0.1%作为分界概率值将该滑坡潜在威胁范围分为极高、高、中、低、极低5个危险性等级。计算结果显示,滑坡实际运动距离在95%置信区间内,实际的威胁范围也在划分的高-极高危险区内,说明评价结果合理,证明了基于运动距离超越概率的滑坡运动危险性评价的有效性。研究成果为滑坡运动距离评价及危险性区划提供了新的思路,具有重要的理论意义和工程实用价值。

关键词:滑坡运动距离;动态数值模型;LHS;超越概率;危险性区划

中图分类号:P694;P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)09-1560-10

Sun X P, Zeng P, Zhang T L, Wang S. Assessment of exceedance probability of landslide run-out distance and hazard zoning. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1560-1569

Abstract: In view of the large uncertainties embedded in the physical and mechanical parameters of the dynamic numerical model, a quantitative method to assess exceedance probability of landslide run-out distance based on Latin Hypercube Sampling (LHS) is proposed to improve the reliability of landslide slide prediction results. In the proposed method, the input parameters are considered as random variables with probability distribution functions; the LHS is used to generate stratified samplings for the random variables, and the dynamic numerical model is used to compute the landslide run-out distance corresponding to each random sample; and finally, the exceedance probability of landslide run-out distance is calculated by constructing limit state functions for different run-out distance threshold values. The proposed method is applied to conduct a probabilistic assessment of the run-out distance for Dabaozi landslide, and the 95% confidence interval of the run-out distance is computed as [196 m, 302 m]. According to the run-out distance-exceedance probability curve, the potential affected area of the landslide is classified into five categories (i.e., extremely high, high, medium, low and extremely low) based on different threshold values of exceedance probability (i.e., 50%, 10%, 1% and 0.1%). The calculation results

收稿日期:2020-04-04;修订日期:2020-06-05

资助项目:国家自然科学基金项目《土质滑坡冲击强度超越概率定量评价方法研究》(批准号:41977224)、国家自然科学基金青年基金项目《基于稀疏随机响应面法的单体滑坡系统失稳概率定量评估》(批准号:41602304)和四川省科技计划《基于自适应克里金方法的三维单体滑坡系统风险定量评估研究》(编号:2019YJ0405)

作者简介:孙小平(1996-),男,在读博士生,从事滑坡运动预测研究工作。E-mail:sunxiaoping@stu.cdut.edu.cn

*通信作者:曾鹏(1987-),男,博士,副研究员,从事地质灾害风险评价教学科研工作。E-mail:zengpeng15@cdut.edu.cn

show that the actual run-out distance of landslide is within the 95% confidence interval, and the actual threat range is also within the classified high-extremely high danger zone. The results show that the evaluation results are reasonable and the landslide movement risk evaluation based on the distance exceeding probability is also proved effective. The proposed method may provide new ideas for landslide run-out distance assessment and for hazard zoning, which has important theoretical significance and practical engineering value.

Key words: landslide run-out distance; dynamic numerical model; LHS; exceedance probability; hazard zoning

滑坡是全世界发生最频繁的危害之一,造成了巨大的人员伤亡和严重的经济损失^[1]。滑坡风险评估与管理作为一种更加合理有效的防灾、减灾理念和模式,一直是国际上倡导和推广的有效途径之一。目前关于滑坡风险评估的研究大多集中在滑坡稳定性评估上,对失稳后滑坡运动过程的研究较薄弱^[2]。在滑坡灾害风险防控中,除需要知道滑坡体是否稳定及何时失稳外,还需要预测滑坡的运动距离^[3],才能定量地确定滑坡体的潜在影响范围,从而全面评估滑坡灾害的风险。

滑坡运动距离预测模型主要有经验统计模型(如詹威威等^[4]、邵葆蓉等^[5]和 Zhan 等^[6])和动态数值模型(如 Hungr 等^[7]、Beguería 等^[8]和 Christen 等^[9])。经验统计模型一般通过建立简单的回归公式对滑坡运动距离进行初步估计,较少考虑自身的物理力学机制,且无法考虑实际复杂地形的影响。动态数值模型在一定程度上能够克服经验统计模型的这些限制,可以对滑坡的运动距离、堆积高度、运动速度等关键信息进行更精细的模拟分析。然而,滑坡运动过程涉及的水文地质、工程地质条件是复杂、多变、随机的,本身就存在较大不确定性。此外,动态数值模型是对滑坡复杂运动过程的简化描述,模型输入参数通常难以直接地、准确地测量^[7, 10-11],这也导致输入参数具有一定的不确定性。这些不确定性通过动态数值模型的传播可能会对模拟结果的准确性产生严重影响。正是由于这些不确定性的存在,动态数值模型现在还大多用于反分析中重现滑坡运动过程,而较少用于滑坡运动过程的正向分析中直接预测滑坡的运动距离^[12]。

随着可靠性理论的发展,可靠性方法为实现滑坡运动过程的正向分析提供了一种可能。在滑坡定量风险评估中,滑坡空间影响概率(滑坡失稳后空间上某位置受到滑坡影响的概率)是风险评估的重要组成部分,该概率可表达为运动距离超越某个阈值的概率,本文将之称为运动距离超越概率。将动态数值模型中的输入参数定义为服从某种分布

的随机变量,利用可靠性方法对滑坡运动距离超越概率进行评价能够有效量化输入参数的不确定性。相比传统的定值分析方法,利用可靠性分析方法得到滑坡运动距离的概率评价结果更能满足风险评估的需要^[3]。蒙特卡洛法(Monte Carlo simulation, MCS)是一种相对精确的可靠性分析方法,其应用广泛,受问题限制的影响较小,适应性很强,误差仅与标准差和样本容量有关^[13],是将可靠性方法与动态数值模型结合的最简单途径之一。国外学者在这方面开展了一些尝试性工作,如 Quan 等^[11]基于动态数值模型 MassMov2D,考虑 Voellmy 模型中湍流系数与基底摩擦系数的不确定性,使用 MCS 随机抽样 5000 次,对动态数值模型输出的某点碎屑流致灾强度进行分布拟合,得到碎屑流的最大堆积高度、最大运动速度的概率分布图与累积概率分布函数;Zahra^[14]基于动态数值模型 MassMov2D,考虑模型输入参数的不确定性,使用 MCS 随机抽样 100 次,得到滑坡堆积厚度超越某个阈值的概率空间分布图。然而,使用 MCS 的计算量非常大,当遭遇小概率问题时(如 10^{-3}),需要计算的次数将达 10^5 次以上,占用大量的计算时间。国外的研究成果为运动距离超越概率评价提供了一定的借鉴,相比之下,根据笔者对国内公开文献的查阅,发现中国在滑坡运动过程超越概率分析方面尚未开展相关研究。

滑坡运动距离超越概率反映了滑坡运动路径上某位置受到影响或威胁的可能性大小。因此,可将超越概率大小作为危险性评价指标进行滑坡运动危险性区划。在中国,基于超越概率计算的危险性区划主要应用于地震灾害研究中,例如,Zaalishvili 等^[15]和唐荣昌等^[16]。对于滑坡、泥石流等地表地质灾害,其危险性区划大多使用确定性方法,尚未使用概率分析的思路^[17-18]。基于超越概率的危险性区划由于考虑了灾害特征的不确定性,是一种较科学的危险性区划方法,也是当前滑坡、泥石流等灾害危险性区划值得借鉴的方法。

本文针对传统滑坡运动距离评估方法难以考虑计算参数不确定性的问题,以及 MCS 计算量大、难以满足工程实际需求的限制,提出将动态数值模型与拉丁超立方抽样 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 进行有机结合,构建一套单体滑坡运动距离超越概率计算方法和基于超越概率的运动危险性区划方法,并以大堡子滑坡为例证明了本文提出方法的可行性与有效性。

1 动态数值模型

Massflow 是一种基于 FORTRAN 程序语言开发的分析滑坡运动行为的动态数值模型^[19-20]。该数值模型将滑体等效为具有流变性质的流体,从而基于经典的 Navier-Stokes 方程,采用深度积分方法,推导出运动体内每一个单元必须满足的质量守恒方程(式(1))和动量守恒方程(式(2)、(3))。在基底阻力模型、滑动路径等参数设定后,即可采用 TVD-MacCormack 有限差分方法求解微分方程^[19-21],模拟滑坡运动的全过程,得到滑坡的运动距离。由于 Massflow 是基于深度积分的连续介质力学方法,把三维计算问题简化为二维计算问题,极大地提升了计算效率,并且在时间和空间上都具有二阶精度^[22]。

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{k_{ap}gh^2}{2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{zx})_b}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left(hv^2 + \frac{k_{ap}gh^2}{2}\right)}{\partial y} = k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\rho} \quad (3)$$

式中, ρ, h, u, v 分别为运动体的密度、运动体的高度、 x 方向与 y 方向的速度; g 为重力加速度; $(\tau_{zx})_b$ 和 $(\tau_{zy})_b$ 为基底阻力; k_{ap} 为侧向土压力系数,该系数可通过朗肯土压力理论确定为^[8-9]:

$$k_a = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad k_p = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (4)$$

基底阻力 τ_b 在滑坡的运动过程模拟中极其重要,目前常用的基底阻力模型包括库伦摩擦模型、

Voellmy 模型-宾汉模型等^[23]。

2 拉丁超立方抽样 (LHS)

LHS 方法是由 Mckay 等^[24]于 1979 年提出的一种多维分层抽样方法。该方法的本质是通过产生分布更加均匀的样本,避免在某一区域反复抽样,从而提高计算效率与计算精度(图 1)。与 MCS 法相比,LHS 方法对均值和方差的估计有显著改善。LHS 的实施步骤如下^[25-26]。

(1) 首先确定模拟次数 N ,然后将变量的概率分布函数等分成 N 个互不重叠的子区间,然后在每个子区间内分别进行独立的等概率抽样,从而避免 MCS 法大量反复的抽样工作。

(2) 为了保证抽取的随机数属于各子区间,第 i 个子区间内的随机数 X 应满足下式:

$$X_i = \frac{X}{N} + \frac{i-1}{N}, \frac{i-1}{N} < X_i < \frac{i}{N} \quad (5)$$

式中, $i=1,2,\dots,N$; X 为 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数。

(3) 每一个子区间仅产生一个随机数,然后采用反变换法,由 N 个子区间产生的随机数得到 N 个某一概率密度函数的随机变量抽样值,最后对随机变量的抽样值进行组合,也就是对各随机变量的抽样值所属区间的序号进行随机排列。

图 2 展示了 MCS 法与 LHS 法分别抽样产生的 10^4 个标准正态随机样本的概率密度图。根据两者概率密度图对比显示,LHS 的抽样数据与标准正态分布函数很吻合,MCS 的抽样数据则包含了噪声,需要增加抽样次数才能反映真实的概率分布,这导致概率分析收敛速度慢。因此,LHS 法比 MCS 法

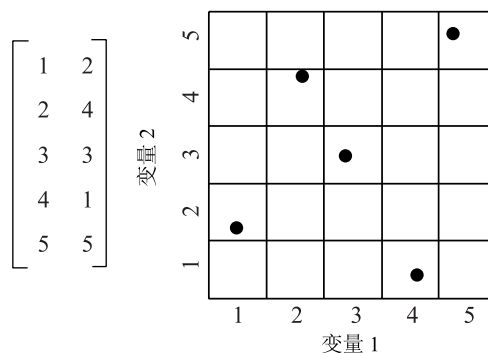
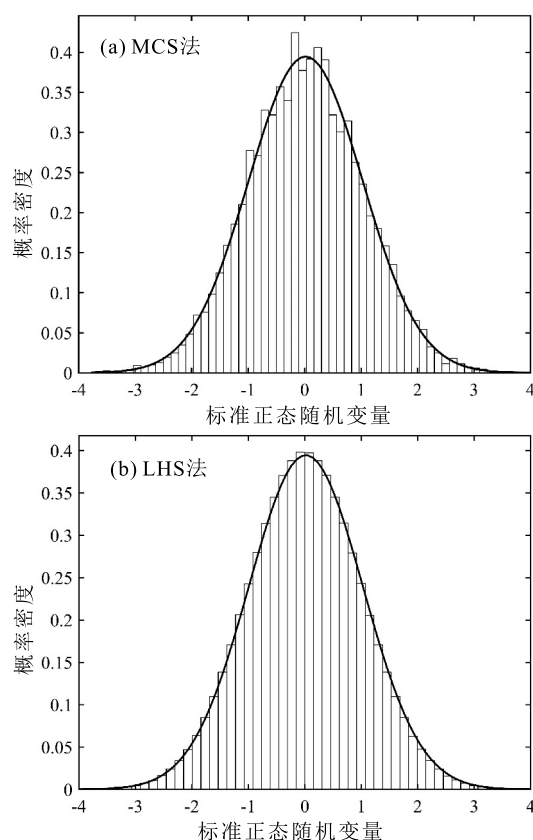


图 1 拉丁超立方抽样(2 个随机变量,5 次模拟)^[25]

Fig. 1 Latin Hypercube sampling (with two variables and five realizations)

图 2 10^4 次抽样的随机样本概率密度图Fig. 2 Probability density of random samples for 10^4 sampling

更能以较少的抽样得到反映变量分布特征的样本,从而增加计算精度与计算效率。

3 滑坡运动距离超越概率分析

传统的滑坡运动距离分析一般使用确定性分析方法,即输入一个确定性参数,通过动态数值模型计算得到一个确定的滑坡运动距离值,从而将其作为滑坡运动距离评价的结果。然而,模型输入参数存在较大的不确定性,确定性分析的结果并不能考虑到这些不确定性对计算结果的影响。因此,本文提出一种滑坡运动距离的概率评价方法,将模型输入参数根据实际情况考虑为服从某种分布类型的随机变量,基于 Massflow 动态数值模型,结合 LHS 法计算滑坡运动距离超越某一阈值的概率(简称运动距离超越概率),为滑坡风险定量评价提供重要参考。滑坡运动距离超越概率计算流程可简要概括如下(图 3)。

(1) 针对具体的单体滑坡,建立 Massflow 确定

性数值计算模型进行滑坡运动过程分析,用于计算滑坡运动距离。

(2) 选定模型输入参数作为随机变量,如密度、粘聚力、内摩擦角、孔隙压力比系数等不确定性参数,并确定它们的统计特征(如均值、标准差、分布类型等)。

(3) 执行 LHS 法对随机变量进行分层抽样,产生 N 组随机样本;将每组随机样本分别代入 Massflow 计算模型,计算获得每组随机样本对应的滑坡运动距离。

(4) 根据承灾体(如建筑物、道路等)与滑坡体的实际距离,确定一个运动距离阈值,建立相应的极限状态函数(Limit State Function, LSF)。一般而言,一旦滑坡运动距离超过承灾体与滑坡体之间的距离会对承灾体造成威胁。因此,笔者更关心潜在滑坡运动距离是否会超过这个阈值;该问题可通过极限状态函数表达如下:

$$g(\mathbf{X}) = L_{\text{threshold}} - L(\mathbf{X}) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为原始空间中的随机变量; $L(\mathbf{X})$ 为使用 Massflow 模型计算得到的滑坡运动距离; $L_{\text{threshold}}$ 为设定的运动距离阈值(一般为承灾体与滑坡体之间的距离)。

(5) 计算滑坡运动距离超越该阈值的概率。式(6)中, $g(\mathbf{X}) < 0$ 表示滑坡运动距离超越阈值, $g(\mathbf{X}) = 0$ 表示滑坡物质刚好到达承灾体(即极限状态), $g(\mathbf{X}) > 0$ 表示运动物质未到达该位置。那么,滑坡运动距离超越概率即为 $g(\mathbf{X}) \leq 0$ 的概率。当 LHS 法中的采样次数 N 足够大时,滑坡运动距离超越概率(P_e)可表达为:

$$P_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(\mathbf{x}) \quad (7)$$

式中, $I(\mathbf{x})$ 通过以下函数确定:

$$I(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ 0 & \text{if } g(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

LHS 法抽样在 Matlab 软件中实现,通过建立 Matlab 与 Massflow 的接口程序,实现两者之间的数据交互。首先,在 Matlab 中使用 LHS 产生 N 个样本;然后,将样本值依次代入到 Massflow 中计算得到 N 个运动距离;最后,将运动距离计算结果返回到 Matlab 中进行超越概率的计算。

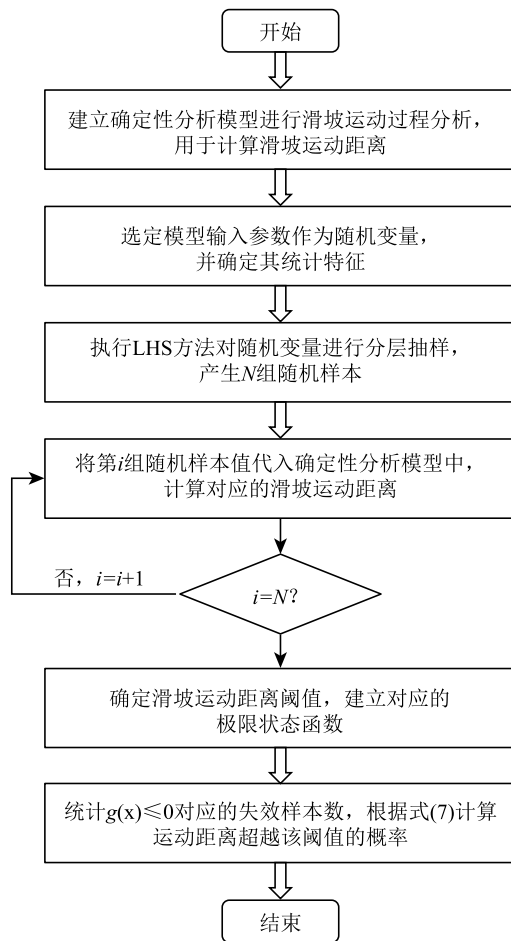


图3 滑坡运动距离超越概率计算流程

Fig. 3 A flow chart to compute the exceedance probability of landslide run-out distance

4 算例及分析

以陕西省咸阳市泾阳县大堡子滑坡^[27]为例,说明本文提出的滑坡运动距离超越概率计算方法。该滑坡发生于2012年4月10日,坐标为东经108°52′12″、北纬34°29′06″,滑坡位置见图4。滑坡体体积约 $20.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡体物质主要为中更新统黄土,少量下更新统和上更新统黄土,为中型纯黄土滑坡。滑坡全貌见图5-a,剖面见图5-b,为了更加直观地展示运动距离,将滑坡后缘位置作为剖面图中水平距离的0 m点位置。滑坡最大水平运动距离为275 m,等效摩擦系数 $H/L=0.26$,属于远程滑坡;横向最大宽度150 m,滑体堆积厚度在3~20 m之间。勘察发现距地面仅1 m便可见地下水,可判断滑面处于饱和状态^[28],也可判断滑坡发生远程滑动与滑动过程中产生的超孔隙水压力有很大关系。

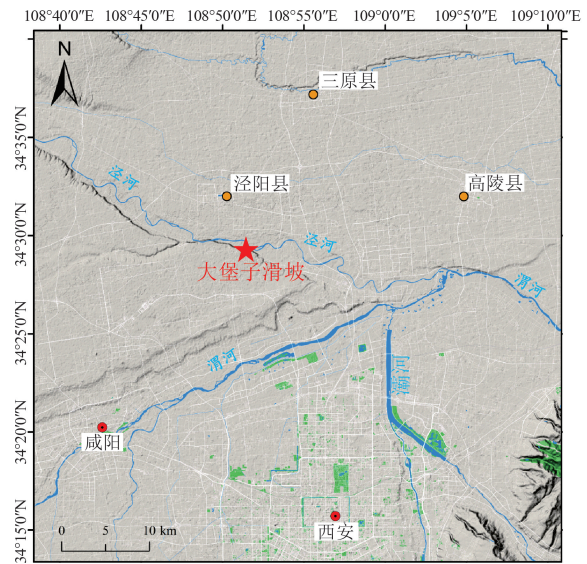


图4 大堡子滑坡位置

Fig. 4 Location of Dabaozi landslide

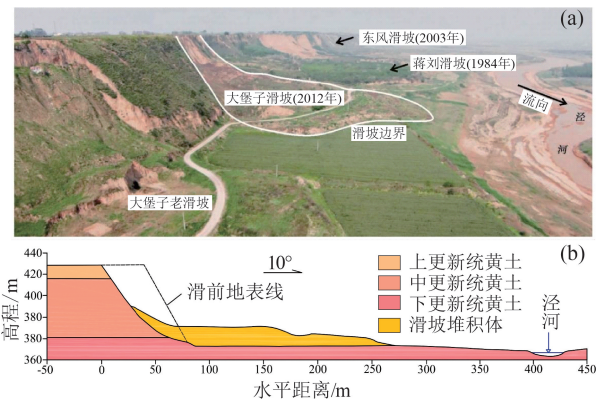
图5 大堡子滑坡全貌图(a)与剖面(b)^[27]

Fig. 5 Overall views(a) and a typical section(b) of Dabaozi landslide

4.1 模型与参数

概率分析需建立在确定性分析模型的基础上。在本案例中,Massflow被用于滑坡运动距离的确定性分析。根据大堡子滑坡剖面图(图5-b),在Massflow中建立了大堡子滑坡计算数值模型,如图6

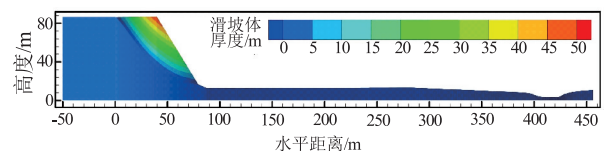


图6 大堡子滑坡动态数值计算模型图

Fig. 6 Dynamic numerical model of Dabaozi landslide

所示;蓝色部分表示滑床,彩色条纹部分表示滑体。该计算模型的计算网格大小为 1 m,网格数为 507 个;计算总时间为 25 s,时间步为变时间步长,初始时间步长 0.05 s, *courant* 数为 0.25 (*courant* 数为限制时间步长的一个无量纲参数,调节计算的稳定性与收敛性,在滑坡运动模拟中 *courant* 数的取值见 Ouyang 等^[19])。由于黄土颗粒较细,孔隙水压力消散困难,在滑动过程中孔隙水压力容易发生累积,产生超孔隙水压力,使滑带土仅能发挥较低的抗剪强度。因此,基底摩擦阻力模型采用能够考虑孔隙水压力影响的库伦摩擦模型。在有效应力条件下,该模型表示滑坡运动过程中的基底阻力 τ_b 为:

$$\tau_b = c' + \sigma(1 - r_u) \tan \varphi' \quad (9)$$

式中, $\sigma = \rho gh$, 为基底正应力; c' 为残余有效粘聚力; φ' 为残余有效内摩擦角; r_u 是孔隙压力比系数,为孔隙水压力 u 与基底正应力 σ 之比,反映了运动体的液化程度,范围为 0~1。

本文将动态数值模拟计算中的 4 个物理力学参数 (c' 、 φ' 、 ρ 、 r_u) 考虑为随机变量。对于不确定性参数统计特征的描述,往往需要收集大量的数据进行统计分析。在实际工程中,开展大量试验工作的费用和时间成本都难以接受。因此,对于不确定性参数的统计特征,一般可结合有限试验数据、文献数据和相关规范综合分析确定。

由图 5-b 可知,该滑坡的滑面主要在中更新统黄土中,因此为简化起见,在模拟分析中仅考虑中更新统黄土的物理力学参数。沈伟等^[27]通过固结不排水三轴试验,测得该滑坡的中更新统黄土残余有效摩擦角 $\varphi' = 25^\circ$,残余有效粘聚力 $c' = 39$ kPa,密度 $\rho = 1800$ kg/m³。由于试验数据有限,将该组试验测得的粘聚力、内摩擦角及密度假定为随机变量的均值,而随机变量的变异性和分布类型参考相关文献资料确定。

《地质灾害防治工程勘察规范》^[29]对土体参数变异性的分级做出了评价(表 1)。袁晓蕾^[30]收集了 9 个地区的 32 组黄土滑坡的黄土土性进行统计分析发现:对于单个滑坡滑带土的统计表明,大多数粘聚力的变异性属于中等-高变异性(变异系数为 0.2~0.4),大多数内摩擦角的变异性属于低变异性(变异系数为 0.1~0.2),大多数密度的变异性属于很低变异性(变异系数为 0~0.1)。根据袁晓蕾^[30]的统计结果,取每个参数相应的变异系数范围

的均值作为该参数的计算变异系数(表 2)。此外,倪万魁等^[31]对黄土高原典型地段黄土土性参数进行了详细的统计分析,利用 K-S 检验法和 A^2 检验法对黄土抗剪强度指标的分布类型进行了检验,发现黄土抗剪强度指标大多服从正态分布和对数正态分布。为避免随机抽样过程中出现负值导致动态数值计算无法进行,本算例使用对数正态分布作为土体密度、粘聚力和内摩擦角的分布类型。

由于滑坡过程中孔隙水压力变化非常复杂,孔隙压力比系数 (r_u) 的确定非常困难,目前常通过对历史滑坡运动过程的反分析确定该系数。相关文献反分析结果的统计研究发现,滑坡孔隙压力比系数的范围一般在 0.5~0.8 之间^[32]。考虑参考文献中的参数统计范围,本文将孔隙压力比系数定义为 [0.5, 0.8] 范围内服从均匀分布的随机变量。用于滑坡运动距离超越概率分析的随机变量统计特征见表 2。

为了说明利用动态数值模型计算滑坡运动距离的过程,以表 2 所示计算参数的平均值作为模型输入参数,进行一次确定性运动距离计算(本文将运动距离定义为滑坡后缘与运动物质堆积体前缘之间的距离)(图 7)。由于进行的是一维计算(即质量与动量守恒方程中的 y 方向不参与计算),单次滑坡过程模拟的计算时间只需要 4 s(计算机配置为 Intel® X®(R) E5-2630 v4 CPU @ 2.2 GHz and 32 GB RAM)。基于计算参数平均值得到的滑坡水平运动距离为 230 m,明显小于实际观测到的滑坡水平运动距离(275 m),而这种对于滑程的低估将对滑坡周围人民群众的生命财产安全带来巨大的风险。

表 1 土体参数的变异级别^[29]

Table 1 Variability classification of soil parameters

变异系数	$\delta \leq 0.1$	$0.1 < \delta \leq 0.2$	$0.2 < \delta \leq 0.3$	$0.3 < \delta \leq 0.4$	$\delta > 0.4$
变异性	很低	低	中等	高	很高

表 2 随机变量的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of random variables

随机变量	ρ /(kg · m ⁻³)	c' /kPa	φ' /°	r_u
均值	1800	39	25	0.65
变异系数	0.05	0.3	0.15	—
参数范围	[0, +∞)	[0, +∞)	[0, +∞)	[0.5, 0.8]
分布类型	对数正态	对数正态	对数正态	均匀

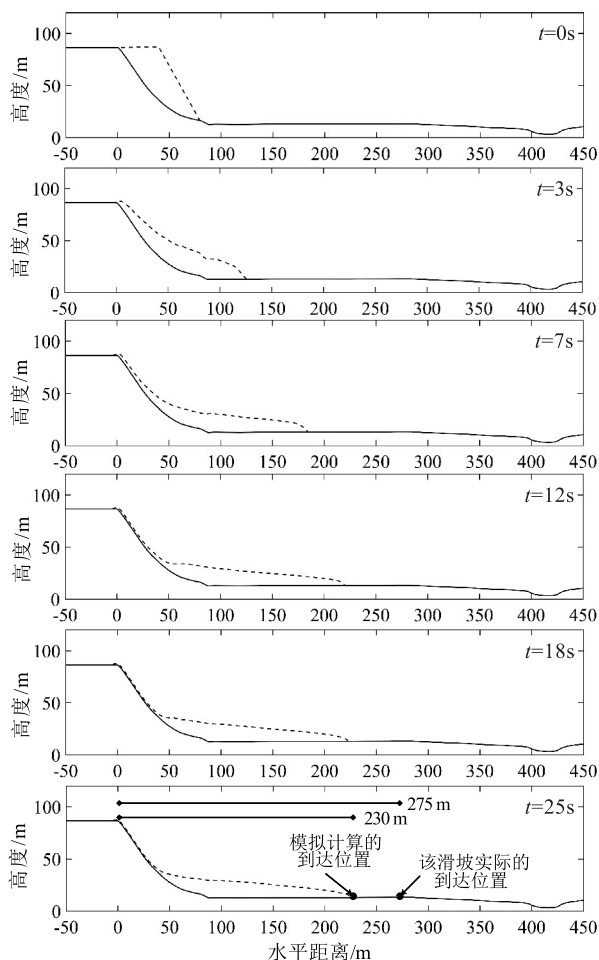


图7 滑坡运动距离的确定性分析过程

Fig. 7 Deterministic analysis of landslide run-out distance

4.2 超越概率计算结果及运动危险性区划

根据随机变量 ρ 、 c' 、 φ' 、 r_u 的统计信息, 基于 Matlab 建立概率分析模型, 使用 LHS 产生 $N=10^4$ 个随机样本, 并通过确定性分析模型分别计算它们对应的滑坡运动距离。将计算所得的 10^4 个运动距离结果数据进行统计分析, 绘制运动距离的概率密度图, 经 K-S 总体分布检验结果显示, 数据总体服从广义极值分布 (图 8)。滑坡运动距离的平均值为 240 m, 最大值为 367 m, 最小值为 167 m, 95% 置信水平下的置信区间为 [196 m, 302 m]。滑坡实际运动距离为 275 m, 在 95% 的置信区间以内, 说明该计算结果合理。

基于 LHS 的采样结果, 通过考虑空间任意点与滑坡体后缘之间的距离 (即多个运动距离阈值), 可构建多个极限状态函数, 从而计算运动距离超越任

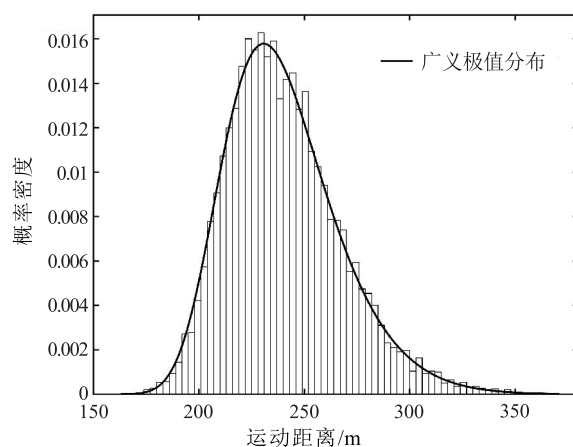


图8 运动距离的概率密度

Fig. 8 Probability density of the run-out distance

意阈值的概率, 并进一步绘制运动距离-超越概率曲线 (图 9)。可以发现, 滑坡运动距离超越概率随着阈值距离的增加而减少, 说明离滑坡体越远的位置危险性越低。当概率值大于 50% 时, 事件发生概率大于不发生的概率; 另外, 假设运动距离服从正态分布, 理论上, 50% 超越概率位置点对应的运动距离是概率预测的最有可能的运动距离, 从而超越概率大于 50% 的区域是极其危险的。参考 Lacasse 等^[33] 给出的灾害事件可能性分类 (表 3), 本文以滑坡运动距离超越概率 50%、10%、1% 和 0.1% 作为分界值, 将滑坡运动危险性分为极高、高、中、低、极低 5 个危险区 (图 9)。划分结果显示, 滑坡实际的堆积范围处于高-极高危险区内; 说明基于运动距离超越概率的危险性划分结果是符合实际的, 在一定程度上可以指导滑坡风险评估和管理。在实际工程中, 基于运动距离超越概率的滑坡运动危险性区划结果, 将有助于区分易受滑坡威胁的区域和较易受滑坡威胁的区域, 以便及时采取相应的防灾减灾行动与措施。

4.3 计算结果分析与讨论

4.3.1 模拟次数分析

图 10 分别给出了 $L_{\text{threshold}} = 275$ m 条件下, LHS 法和 MCS 法在不同模拟次数情况下超越概率的计算结果。MCS 和 LHS 方法主要区别在于抽样方式的不同, 因此, MCS 计算超越概率只需要在 LHS 计算超越概率的步骤 (3) 中使用 MCS 随机抽样, 其他步骤一致。结果显示, 在不同模拟次数下, LHS 法

表 3 事件可能性分类^[33]

Table 3 Event likelihood classification

不确定性	描述	概率值/%
几乎确定	由已知物理条件或过程, 事件几乎确定发生	99.9
非常可能	事件极有可能发生, 但也可能不会发生, 如果没有发生, 人们会感到惊讶	99
可能	事情是可能发生的, 但不一定发生	90
完全不确定	没有理由相信一种结果比另一种结果更可能或更不可能发生	50
不可能	事件不太可能发生, 但它有可能发生	10
非常不可能	不能根据已知的物理条件或其他原因完全排除事件发生的可能性	1
几乎不可能	由已知的物理条件或过程, 事件几乎不可能发生	0.1

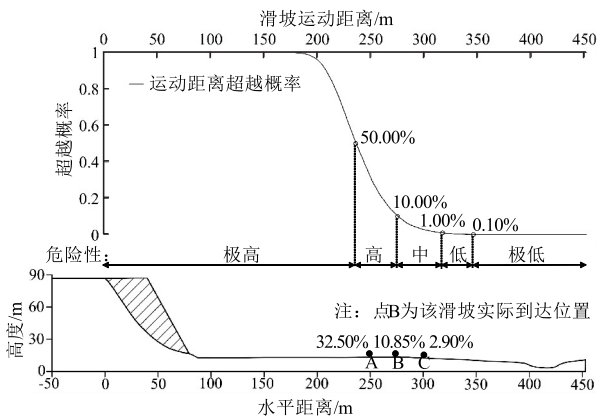
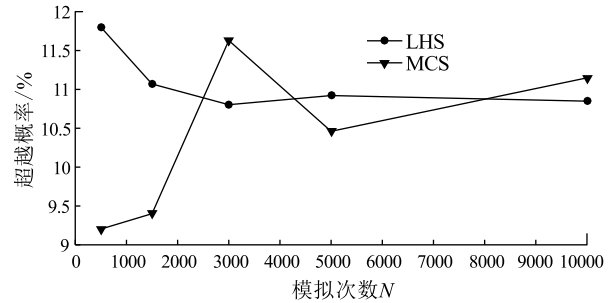


图 9 运动距离-超越概率图及运动危险性分区

Fig. 9 Run-out distance-exceedance probability and run-out hazard zoning

得到的超越概率值的波动范围比 MCS 法更小, 表明 LHS 法对超越概率的估值比 MCS 法更稳定。也可以看出, MCS 法在 10^4 次模拟后仍未达到收敛, LHS 法在 3000 次模拟后已达到收敛。因此, 采用 10^4 次 LHS 是足够的, 计算得到的超越概率值相对准确。总体而言, 与 MCS 法相比, LHS 法计算结果的收敛性更佳, 超越概率估值更加稳定, 在计算效率与计算精度上都有显著的改善。然而, 即使使用 3000 次的 LHS 模拟分析, 且基于计算效率较高的 Massflow 软件, 单次滑坡运动距离超越概率分析仍然需要约 3.5 h。

图 10 不同模拟次数的超越概率计算结果($L_{\text{threshold}} = 275 \text{ m}$)Fig. 10 Computed results of exceedance probability for different simulation times ($L_{\text{threshold}} = 275 \text{ m}$)

4.3.2 不确定性与确定性计算结果对比分析

采用参数均值计算的滑坡运动距离为 230 m, 如果从确定性分析的角度看, 与滑坡体后缘距离为 230 m 以上的区域可能是安全的, 不存在受到滑坡威胁的可能性。但是, 滑坡实际运动距离为 275 m, 确定性分析结果低估了滑坡的运动距离, 这种低估在实际防灾工作中是非常致命的。从不确定性分析结果看, 滑坡运动距离达到 250 m 的概率高达 32.50%, 达到 275 m 的概率为 10.85%, 达到 300 m 的概率仍有 2.90%。另外, 不确定分析结果给出了 95% 置信水平下的运动距离置信区间为 [196 m, 302 m]。可以发现, 不确定性方法考虑了多种不利参数组合, 给出的是一个区间范围或到达某位置的概率而不是一个确定性的值, 其评价结果更不容易低估滑程, 具有更大的可靠性和灵活性。因此, 综合分析确定性和不确定性评估结果才能更合理地进行滑坡运动距离及其危险性评价。

在工程实践中, 基于概率与统计理论的不确定性方法在某些方面优于传统确定性方法, 前者的计算结果(超越概率)可直接应用于滑坡风险定量评估中^[3]。虽然确定性方法计算步骤更简便、计算结果更直观(如滑坡运动距离), 但只有在输入正确的模型参数值时才能得到合理的结果。然而, 当使用动态数值模型预测滑坡运动距离时, 现阶段难以甚至不可能获得正确的输入参数值(例如, 本研究中使用的孔隙压力比系数)。不确定性评价方法充分考虑各种计算参数的不确定性特征及其潜在取值范围, 将其考虑为服从某种概率分布的随机变量, 通过随机模拟给出滑坡运动距离超过给定阈值的可能性(超越概率), 其评价结果具有更大的可靠性。

和灵活性。对于决策者而言,在制定滑坡风险防控方案时,可根据运动距离超越概率的大小,对滑坡的潜在威胁程度进行排序,以便确定防灾减灾工作的优先顺序。

4.3.3 滑坡动力学参数统计分析的困难

虽然从不确定性的角度可以计算滑坡运动距离超越概率并进行运动危险性分区,但这种方法严重依赖滑坡物理力学参数(特别是动力学参数)可靠的统计分析。如本文例举的大堡子滑坡仅有一组物理力学参数试验数据,这些参数的统计特征主要是通过已有文献对比研究确定,存在较大的误差。实际滑坡风险评估工作中,受人力、物力的限制,很难开展大量试验研究来获取这些参数的统计特征。因此,如何在有限的条件下(如基于少量试验样本),获取滑坡物理力学参数可靠的统计特征仍是一个有待解决的问题。另外,由于滑坡运动过程中孔隙水压力变化极其复杂,孔隙压力比系数确定非常困难。本文使用的该参数范围值只是一个初步统计,如何获取该参数可靠的统计特征也是一个需要解决的问题。

5 结 论

本文使用 LHS 方法建立了滑坡运动距离超越概率计算模型,提出了基于超越概率的滑坡运动危险性划分方法,并将该方法应用于大堡子滑坡的运动距离评价及运动危险性区划中。主要得出如下结论。

(1)为了量化计算参数的不确定性,本文提出了基于超越概率的滑坡运动距离评价方法,其评价结果更能满足定量风险评价的需要。

(2)LHS 法作为一种分层抽样技术,能够避免重复抽样的问题,收敛速度和计算稳定性都要优于 MCS 法,可有效提高滑坡运动距离超越概率计算的效率。

(3)基于大堡子滑坡运动距离超越概率计算结果,使用 50%、10%、1% 和 0.1% 超越概率作为分界值,绘制了该滑坡的危险性区划图。结果表明,本文提出的基于运动距离超越概率危险性区划方法是可行的,为滑坡运动危险性区划提供了一种新的思路。

(4)概率评价方法能定量地考虑物理力学参数的不确定性对滑坡运动距离计算结果的影响,给出运动距离超越概率的评价结果,是对传统确定性分析方法的有益补充。

(5)需要指出的是,滑坡运动距离超越概率定量评价仍然面临 2 个问题:首先,计算量大,特别是在三维计算时,计算成本将成倍增加;其次,获取随机变量(例如孔隙压力比系数)可靠的统计特征性还很困难。这些问题都有待进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65-87.
- [2] 吴越, 刘东升, 周忠浩. 考虑滑动过程内部崩解耗散的滑坡体运动模型[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 35-46.
- [3] Corominas J, van Westen C, Frattini P, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 209-263.
- [4] 詹威威, 黄润秋, 裴向军, 等. 沟道型滑坡-碎屑流运动距离经验预测模型研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 154-163.
- [5] 邵葆蓉, 孙即超, 朱月琴, 等. 基于多元回归的黄土滑坡滑动距离预测模型探讨——以甘肃天水地区为例[J]. *地质通报*, 2020, 39(12): 1993-2003.
- [6] Zhan W, Fan X, Huang R, et al. Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2017, 17(6): 833-844.
- [7] Hung O, McDougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(5): 978-992.
- [8] Beguería S, Van Asch T W J, Malet J P, et al. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9(6): 1897-1909.
- [9] Christen M, Kowalski J, Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63(1/2): 1-14.
- [10] Van Westen C J, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(2): 167-184.
- [11] Quan L. Dynamic numerical run-out modeling for quantitative landslide risk assessment [D]. *Doctoral Thesis of University of Twente, ITC*, 2012, 206: 1-237.
- [12] Luna B Q, Cepeda J, Stumpf A, et al. Application of a Monte Carlo method for modeling debris flow run-out [C]//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012.
- [13] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [14] Zahra T. Quantifying uncertainties in Landslide Runout Modelling[M]. *University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC)*, 2010.
- [15] Zaalishvili V B, Rogozhin E A. Assessment of seismic hazard of territory on basis of modern methods of detailed zoning and seismic microzonation [J]. *Open Construction and Building Technology Journal*, 2011, 5: 30-40.
- [16] 唐荣昌, 张耀国, 黄祖智, 等. 四川石棉—西昌地区地震区划研究[J]. *地*

- 震研究, 1993, 16(3): 306-315.
- [17] 唐川, 周钜乾, 朱静, 等. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究[J]. 灾害学, 1994, 9(4): 7-13.
- [18] Wei F, Hu K, Lopez J L, et al. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 594.
- [19] Ouyang C, He S, Xu Q, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 1-10.
- [20] Ouyang C, He S, Tang C. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area[J]. Engineering Geology, 2015, 194: 62-72.
- [21] Ouyang C, He S, Xu Q. MacCormack-TVD finite difference solution for dam break hydraulics over erodible sediment beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 141(5): 06014026.
- [22] Ouyang C, Zhao W, He S, et al. Numerical modeling and dynamic analysis of the 2017 Xinmo landslide in Maoxian County, China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(9): 1701-1711.
- [23] Xing A G, Wang G, Yin Y P, et al. Dynamic analysis and field investigation of a fluidized landslide in Guanling, Guizhou, China[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 1-14.
- [24] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239-245.
- [25] Olsson A, Sandberg G, Dahlblom O. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis[J]. Structural Safety, 2003, 25(1): 47-68.
- [26] 吴振君. 土体参数空间变异性模拟和土坡可靠度分析方法应用研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文, 2009.
- [27] 沈伟, 翟张辉, 李同录, 等. 陕西泾河南岸大堡子高速远程黄土滑坡运动过程模拟[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1309-1317.
- [28] 郭剑. 一种双层结构的高速远程滑坡运动学模型及应用[D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [29] 重庆市质量技术监督局. DB50/T 143-2018 地质灾害防治工程勘查规范[S]. 2018.
- [30] 袁晓蕾. 黄土滑坡的滑带土强度试验参数统计及可靠性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2007.
- [31] 倪万魁, 韩启龙. 黄土土性参数的统计分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 62-67.
- [32] Gao Y, Yin Y, Li B, et al. Investigation and dynamic analysis of the long runout catastrophic landslide at the Shenzhen landfill on December 20, 2015, in Guangdong, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(1): 13.
- [33] Lacasse S, Nadim F. Learning to live with geohazards: from research to practice[M]. Geo-Risk 2011: Risk Assessment and Management, 2011: 64-116.