

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220109002

贵州水城高速远程滑坡运动过程及动力参数分析*

徐奕梓¹, 樊晓一^{1,2}, 杨维斌³, 王 珏¹

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学工程安全评估与防护研究院, 四川 成都 610500; 3. 成都理工大学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)

摘要: 高速远程滑坡的运动速度、厚度和致灾能量在时程、运程上的分布是揭示灾难性滑坡致灾的重要指标。水城滑坡是近年来降雨诱发的典型隐蔽性、突发性高速远程滑坡, 利用Massflow模型以上述多个指标参数为研究核心揭示其致灾特征。研究结果表明: 滑坡运动的基底摩擦角和孔隙水压力系数分别为 20° 和0.4; 滑坡历时约60 s, 最大前缘运动速度为42 m/s, 左右两侧前缘滑坡体堆积厚度分布分别呈现“双峰”和“单峰”特征, 最大堆积厚度为22 m; 左右主滑方向上的最大动能分别为 1.75×10^6 J和 8.5×10^5 J; 房屋建筑区用时8 s完全被掩埋, 建筑物监测点处最大冲击力估算值分别为3 346 kPa和1 049 kPa, 远大于山区农村房屋建筑所能承受的荷载极值。研究成果为灾难性高速远程滑坡碎屑流的动力学效应分析提供参考, 对滑坡灾变风险的定量评估提供了依据。

关键词: 高速远程滑坡; Massflow; 运动速度; 堆积厚度; 冲击力

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0987-12

Analysis of Motion Process and Dynamic Parameters of High-speed and Long-distance Landslide in Shuicheng, Guizhou Province

XU Yizi¹, FAN Xiaoyi^{1,2}, YANG Weibin³, WANG Jue¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Engineering Safety Assessment and Protection Research Institute, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The distribution of velocity, thickness, and kinetic energy over time and the course of high-speed and long-distance landslides are important indicators for revealing the disasters caused by catastrophic landslides. Shuicheng landslide is a typical hidden, sudden high-speed remote landslide induced by rainfall in recent years. This paper uses Massflow to reveal its disaster-causing characteristics, with the above-mentioned multiple index parameters as the core of the research. The simulation results show that the base friction angle and pore water pressure coefficient of landslide motion are 20° and 0.4, respectively. The landslide lasted about 60 s. The maximum velocity of the front edge is 42 m/s. The thickness distribution of the front edge landslide mass on the left and right sides shows the characteristics of "double peak" and "single peak", respectively. The maximum accumulation thickness

* 收稿日期: 2022-01-09; 修回日期: 2022-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877524)资助

作者简介: 徐奕梓(1998—), 女, 硕士研究生。主要从事岩土工程及地质灾害方面的研究。E-mail: 1044383621@qq.com

通讯作者: 樊晓一(1974—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程、地质灾害教学科研工作。E-mail: fxy@swpu.edu.cn

is 22 m. The maximum kinetic energy in the left and right main sliding directions are 1.75×10^6 J and 8.5×10^5 J, respectively. The housing construction area was completely buried in 8 seconds. The estimated maximum impact force at the monitoring point of the building is 3346 kPa and 1049 kPa, which is far greater than the extreme load that rural houses in mountainous areas can be withstand. The research results can provide a reference for the analysis of the dynamic effects of catastrophic high-speed remote landslide debris flow in Southwest China, and provide a basis for the quantitative assessment of landslide disaster risk.

Keywords: high-speed and long-distance landslide; massflow; velocity; accumulation thickness; impact force

0 引言

高速远程滑坡因具有体积大、运速快、运程远、破坏能力强和致灾范围广等特点,常导致严重的人员伤亡和财产损失^[1]。近年来,灾难性高速远程滑坡频繁发生,如2010年6月28日贵州关岭滑坡^[2],2013年7月10日都江堰三溪村滑坡^[3],2016年9月28日浙江遂昌苏村滑坡^[4],2017年6月24日新磨村滑坡等^[5]。

针对高速远程滑坡灾害,国内外相继开展了理论研究,提出了相应的理论模型,即空气润滑模型、颗粒流模型、能量传递模型、底部超孔隙水压力模型等^[6],但这些模型并不对所有的高速远程滑坡有效,也不能完全解释滑坡的远程滑坡机制。高速远程滑坡的突发性和隐蔽性特征使得滑坡运动过程的捕捉存在较大难度,而室内模型试验的局限性无法充分体现滑坡高速远程的运动特征^[7-8]。因此,计算机科学的发展让数值模拟方法成为目前研究人员探究高速远程滑坡动力特征的有效手段。数值模拟方法是基于遥感和现场滑坡体取样调查并选用适当的物理模型开展后续研究工作,不仅可重现整个滑坡运动过程,还能对滑坡灾变风险进行定量评估。目前比较常见的数值模型方法有连续介质力学方法、非连续介质力学方法、光颗粒流体动力学方法、质点法、计算流体力学和离散单元法。其中连续介质模型作为动力学数值建模方式之一,在高速远程滑坡的研究中得到广泛运用,如DAN-3D、Massflow等数值模型,适用于流动型滑坡的模拟研究^[9]。相比于离散单元法和不连续变形分析方法,深度积分连续介质力学法在计算时长和相关参数的确定等方面具有较大优势。近年来,Massflow作为基于深度积分连续介质力学理论

溃坝的运动过程,对高速远程滑坡模拟取得了较好的成果,从模型计算结果中获取相关运动过程、速度分布、堆积厚度等致灾参数^[10-11],充分验证了软件和计算模型的适用性和有效性,为研究高速远程滑坡-碎屑流的动态过程提供了技术方法。

2019年7月23日,贵州省六盘水市水城县鸡场镇附近的斜坡上部突发山体滑坡,水平运动距离约1400 m,前后缘高差490 m,滑坡覆盖区域面积约 30×10^4 m³,造成42人死亡,9人失联,21栋民房被冲毁掩埋。水城滑坡为典型的降雨诱发、高位启动、远程运动、堆积层失稳的灾难性滑坡碎屑流,是近年来破坏性较大的山体滑坡之一。本文借助Massflow模型对水城滑坡动力过程进行模拟,对堆积形态、运动速度和运动能量等参数进行深入研究,有助于充分理解此类滑坡碎屑流的致灾运动堆积,对滑坡灾变风险的定量评估具有重要的意义。

1 水城滑坡地质背景及诱发因素

1.1 地质背景

水城滑坡位于贵州省六盘水市水城县西南部(图1(a)),地处云贵高原中部,区域地貌为中高山深切沟谷,地理坐标为东经 $104^{\circ}40'5.27''$,北纬 $26^{\circ}15'22.20''$ 。滑坡发育于山脊呈E、N向展布的卯家山山体中部,受中部山脊地形切割和两侧沟谷地形导引,滑坡体被分割为左中右三部分(图1(b))。滑坡区基岩主要由二叠系上统峨眉山玄武岩组第一段($P^2\beta^1$)和第二段($P^2\beta^2$)构成。第一段玄武岩分布于坡体上部,为深灰色玄武岩熔岩集块岩,分布高程为1600~2083 m;第二段玄武岩分布于岩体下部,为深灰色厚层至块状拉斑玄武岩,顶部为红褐色、灰白色玄武土,分布高程为1200~1600 m。坡体基岩表层为第四系崩坡积、残积碎石土、块石土及粉质黏

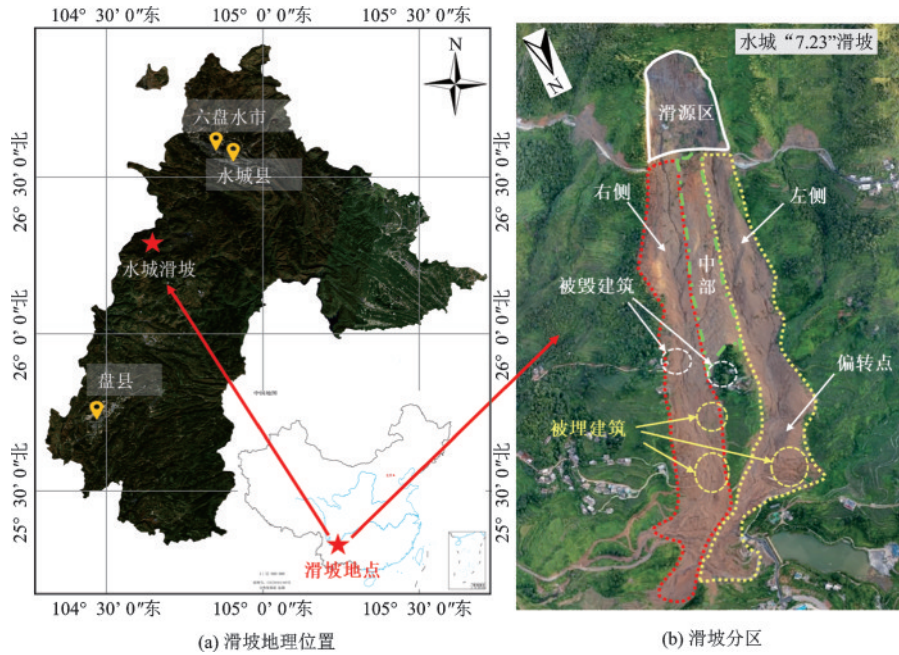


图1 滑坡地理位置及滑坡分区

Fig.1 Geographical location and partition map of the study area

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1569号的标准地图制作

土。滑坡区及其周边范围内无大规模断裂、褶皱等地质构造发育。水城滑坡体结构由上部残、坡积的堆积层和下部的二叠系峨眉山玄武岩组成,其类型属于强降雨诱发的堆积层滑坡,其发生机制不同于之前西南地区发生的玄武岩基岩滑坡^[12]。

为确定滑源区滑坡初始体积、滑体堆积范围和携卷夹带位置。在获得5 m空间分辨率的DEM基础上生成间距为1 m的等高线,在灾后现场利用无人机技术生成滑坡后地形等高线(间距1 m)。将滑前滑后地形数据对准后进行差分计算,从高程变化图中(图2)能看出,滑源区滑动前后最大高差为36 m,最大堆积厚度约为22 m,滑源区初始体积约为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆积体积约为 $130 \times 10^4 \text{ m}^3$,主要的铲刮位置位于滑源区以下两侧沟谷及沟谷以上的范围之间。

1.2 诱发因素

研究区为典型的亚热带季风气候,降雨分布不均匀,雨水主要集中在5~7月,约占全年的60%。年平均降水量约1 100 mm,2019年7月的降雨量为344 mm,在7月19日、20日和22日的降雨量分别为49 mm、37.1 mm和85.5 mm。滑坡前期降雨量充足,滑坡发生前一天降雨量达到当月降雨量的最大值^[13-14],水城滑坡的发生与前期有效降雨量密切相关。滑源区植被茂盛,植被发育的斜坡非饱和带土体具有

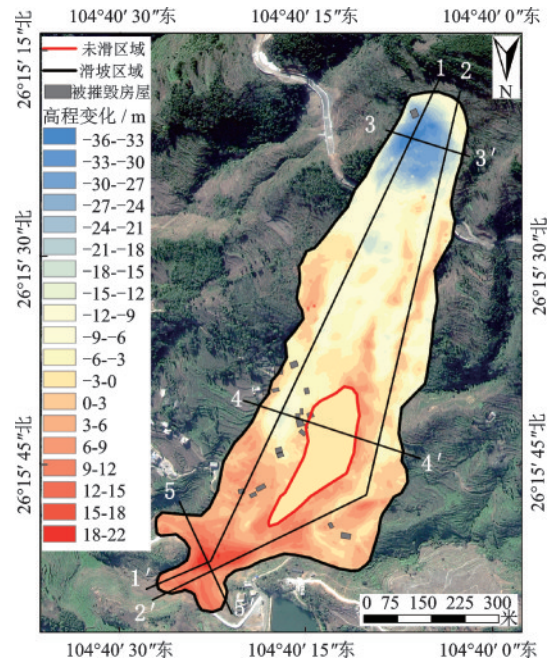


图2 滑坡前后高程变化

Fig.2 Elevation changes before and after the landslide

强吸、强贮、高渗透性的特点,显著增加了降雨的入渗量,优化了地下水的补给环境,提高了地下水的径流模量。此外,滑源区前部为2019年新改建的公路,公路外侧新建了路基挡墙,不利于降雨和斜坡上部来水的迅速及时排泄,造成土层饱水松软且内部存在较大的孔隙水压力,最终形成灾难性滑坡。连续强降雨、

植被截留入渗增大地下水补给、工程建设阻止了地下水排泄是引发滑坡的主导因素。

2 研究方法及参数设置

2.1 Massflow 软件

Massflow 软件是基于深度积分的连续介质力学理论,提出的一种利用改进 MacCormack-TVD 有限差分法对山地灾害进行动态模拟的数值模型^[15]。滑坡体作为连续介质流体进行时空运算,与以往的离散元数值模型相比,很大程度上提高计算精度和效率,缩短计算时间。对于水城滑坡模拟,Massflow 单元网格物质具有垂直 z 轴的直角笛卡尔坐标系中的质量和动量方程如下^[16]:

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

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + k_{ap}gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} =$$

$$k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{zx})_b}{\rho} + uE$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + k_{ap}gh^2/2)}{\partial y} =$$

$$k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\rho} + vE$$

式中, ρ 为滑坡体密度(g/cm^3); t 为时间(s); u 和 v 分别为 x 和 y 方向滑坡体的速度(m/s); h 为垂直方向上的厚度(m); τ_b 为基础剪应力(Pa); z_b 为滑床高度(m); k_{ap} 为土压力系数,由以下公式(4)计算^[17]:

$$k_{ap} = \frac{2}{\cos^2 \phi} \times \left[1 \mp \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \delta) \cos^2 \phi} \right] - 1 \quad (4)$$

式中, ϕ 和 δ 分别为内摩擦角和基底摩擦角。

大多数滑坡模拟运动期间不考虑滑坡体积的变化,但事实上滑坡运动过程中滑坡体对地表物质的夹带在增加滑坡总体积的同时影响滑坡整体的流动性,从而对潜在的滑坡区域做出更准确的判断。目前一种基于位移指数增长假设的简单材料夹带算法由 S.McDougall 等^[18]提出并被广泛应用至此后的滑坡数值模拟中,称为基础卷吸(也可称为基础夹带),使用者可通过该方法控制滑坡全过程的体积增长率。当考虑基础卷吸时,先对平均增长率 α 进行计算:

$$\alpha = \frac{\ln(V_f/V_0)}{\bar{S}} \quad (5)$$

式中, V_0 和 V_f 分别是初始体积和最终总体积; \bar{S} 为滑坡区域平均路径长度。

对基本卷吸率进行确定,其计算公式为:

$$E = \alpha h \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

模拟时间采用可变时间步长公式计算:

$$\Delta t = \min \left(\frac{2\Delta x Cr}{|\bar{u}| + \sqrt{gh}}, \frac{2\Delta y Cr}{|\bar{v}| + \sqrt{gh}} \right) \quad (7)$$

式中, Cr 为是局部的 Courant 数,其他参数同上。

Massflow 软件以上述的理论模型为基础,结合 ArcGIS 软件平台进行滑坡地形前处理和数据后处理,开展水城滑坡运动动力过程数值模拟分析。

2.2 模型及参数选取

目前 Massflow 软件中已有物理摩擦模型包括 Coulomb-viscous 模型、Voellmy 模型以及 Manning 模型等。其中 Coulomb-viscous 模型适用于滑坡、岩崩等碎屑流灾害^[19]。参考国内外滑坡数值模拟研究成果,水城滑坡选择 Coulomb-viscous 模型作为基底阻力模型。模型涉及参数有土密度 ρ 、黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、基底摩擦角 δ 及孔隙水压力系数 r_u 等力学参数。

考虑到实际滑坡中由于体积膨胀引起的体积增加,则对初始体积设置 1.2 倍的放大系数^[16]。平均增长率由公式(5)计算得出 α 为 0.644×10^{-3} ,其中 V_0 为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$, V_f 为 $130 \times 10^4 \text{ m}^3$, \bar{S} 为 1 200 m。根据滑坡现场勘察和相关文献调研,水城滑坡相关参数见表 1^[20-23]。以往 Massflow 模型研究表明内摩擦角对数值模拟的影响较小,而孔隙水压力系数和基底摩擦角是影响滑坡运动距离和堆积范围的主要因素^[24]。在水城滑坡模拟中,内摩擦角取 32.5° ,采用正交设计方法,对孔隙水压力系数和基底摩擦角进行校核。将孔隙水压力系数设置为 0.4、0.5、0.6,分别在基底摩擦角为 18° 、 20° 、 22° 时进行组合模拟,共 9 组模拟试验(表 2)。模拟结果表明,当基底摩擦角和孔隙水压力系数分别为 20° 和 0.4 时,最大堆积厚度约为 22 m,最大运动距离为 1 380 m,与水城滑坡现场调查一致,水城滑坡数值模型参数见表 3。

表 1 水城滑坡参数取值范围

Table 1 Landslide parameters of the Shuicheng landslide

密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\phi/$ ($^\circ$)	孔隙水压力 系数 λ
2 714	21	30~35	0.4~0.6

表 2 多工况参数

Table 2 Multi-condition parameters

工况	基底摩擦角/(°)	孔隙水压力系数
1-1	18	0.4
1-2	18	0.5
1-3	18	0.6
2-1	20	0.4
2-2	20	0.5
2-3	20	0.6
3-1	22	0.4
3-2	22	0.5
3-3	22	0.6

表 3 水城滑坡 Massflow 模型参数

Table 3 Numerical simulation parameters

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	基底摩擦角 δ / (°)	基底摩擦系数 / μ	孔隙水压力系数 / λ
2 700	20	32.5	20	0.5	0.4

数值模拟结果与实际滑坡的比较可从两个方面来进行评估。第一,根据滑坡模拟范围占实际滑坡范围的比例进行评价,其计算公式为:

$$P = \frac{TP}{TP + FP + FN} \times 100\% \quad (8)$$

式中, TP 表示模拟结果与真实滑坡范围相同部分; FP 表示模拟结果超出真实滑坡范围部分; FN 表示模拟结果没有达到实际滑坡范围部分。

第二,可将模拟滑坡与实际滑坡在主滑方向和横向方向上的厚度剖面进行对比分析,可清楚直观的观察滑坡模拟情况。

图 3 中显示了 TP 、 FP 和 FN 的范围,采用 Arc-

GIS 计算三个参数所占面积并使用公式(8)对水城模拟精度进行计算,结果表明模拟精度为 88%。图中滑坡右侧和左侧偏转处的堆积部分是模拟与实际滑坡范围的主要差异所在,其余部分较为一致,原因主要在于该计算模型是基于等效流体假设的,认为滑坡从开始计算时就进入流动状态,而在实际情况下,滑坡岩土体是在滑动过程中逐渐破碎解体。同时,在模拟中没有考虑基底侵蚀作用,而侵蚀效应在滑坡过程中会在一定程度上改变地表地形从而对滑坡运动方向产生影响^[25],最终导致计算结果的偏差。另一方面,将实际滑坡堆积厚度与模拟滑坡堆积厚度进行对比,图 4 中无论是在主滑方向或在横向方向上的高程剖面,其模拟堆积厚度与

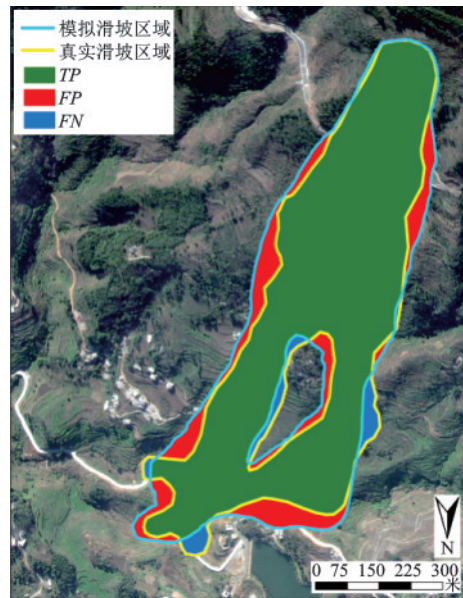


图 3 模拟滑坡边界与实际滑坡边界对比

Fig.3 Comparison of the simulated and measured trimlines of the Shuicheng landslide

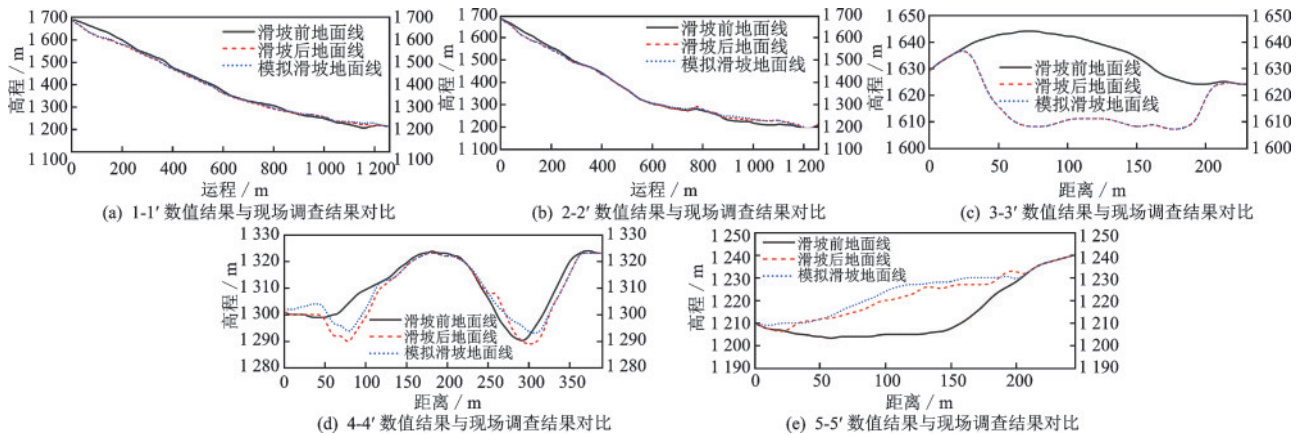


图 4 数值结果与现场调查结果对比

Fig.4 Comparison of the numerical results and field investigations

真实堆积厚度较为匹配,以上两个方面表明 Mass-flow 模型对水城滑坡的模拟有较好的适用性。

3 滑坡动力过程分析

3.1 滑坡运动堆积形态及厚度分布

Y.B.Zhang 等^[23]通过 Hilbert-Huang 变换对地震信号进行分析,得出滑坡持续时间约为 60 s(图 5)。与模拟计算的滑坡运动持续时间一致(图 6)。

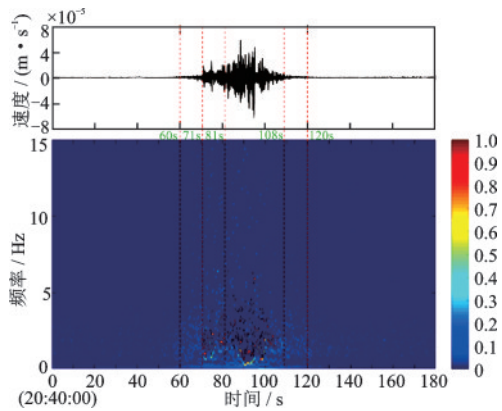


图 5 水城滑坡地震分析结果

Fig.5 Seismic analysis results of the Shuicheng landslide

为深入探究水城滑坡在启动、加速运动、致灾和堆积时段的特征,图 6 显示了滑坡分别在 0~60 s 的滑坡运动状态和致灾范围。0~10 s 阶段滑坡体重力势能转化为动能,失稳后滑坡体整体向下运

动。前缘滑体在运动至 20 s 时,受局部山脊地形切割和两侧沟谷地形导引,滑坡体被分割为左右两部分,开始进入两侧冲沟。20~30 s 阶段少部分滑体停滞堆积在中部山脊区域,其余滑体沿着两侧沟壑高速向下运动,冲毁掩埋了两侧沟壑内的房屋,是导致严重的人员伤亡和失踪的主要原因。30~40 s 阶段左侧前缘部分滑体撞击前方地形,另一部分滑体运动方向发生偏转。40~60 s 阶段前缘滑体运动至坡脚处,后方物质沿左右两侧沟谷运动方向向前汇集,堆积区滑体厚度不断增加,最大堆积厚度为 22 m。

滑坡沿程的厚度分布影响着滑坡的致灾强度,运用数值模拟可揭示滑坡在运动时刻的厚度分布及演化过程。某一时刻左右两侧运动厚度在不同位置分布特征如图 7(a)、图 7(b)所示。图中只显示了剪出口以下的滑坡水平距离厚度分布。在剪出口位置,滑坡体厚度随着时间的增加而减小,40 s 之后厚度保持稳定但不为 0,主要是由于滑源区滑体滑动后形成的凹状地形使得下部部分滑体滞留堆积。从堆积特征上分析,右侧(1-1')主滑方向上,滑坡体主要堆积在坡脚处,前缘堆积区有“单峰”的特征;左侧(2-2')主滑方向上,前缘的滑坡体堆积形态呈现“双峰”的特征,滑坡体发生偏转后,后缘物质在运动过程中向前缘物质传递能量,待能量消耗完后在平坦地形上堆积,前缘物质则继续向前运动直至停止堆积,是出现两个厚度峰值主要原因。

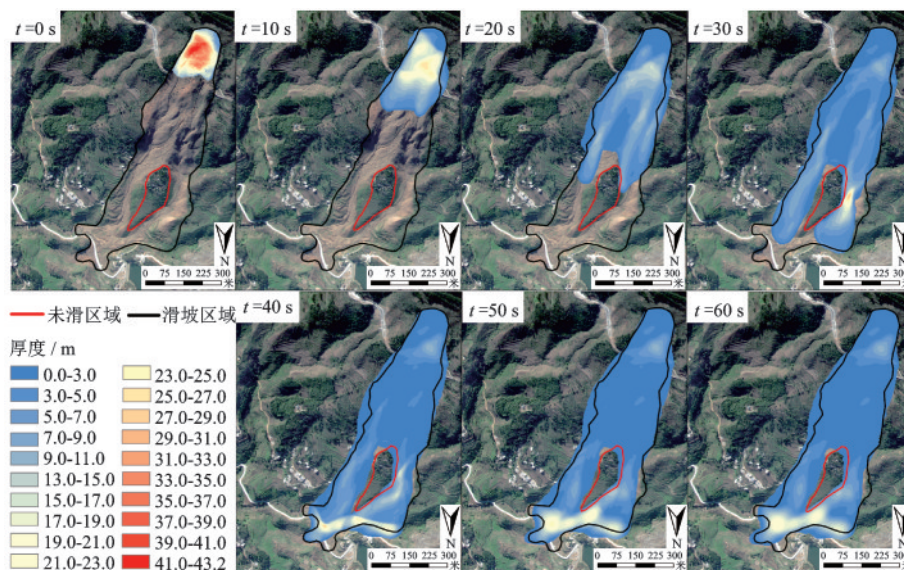


图 6 水城滑坡不同时刻运动厚度分布

Fig.6 Snapshots of the computed flow height contours of the Shuicheng landslide

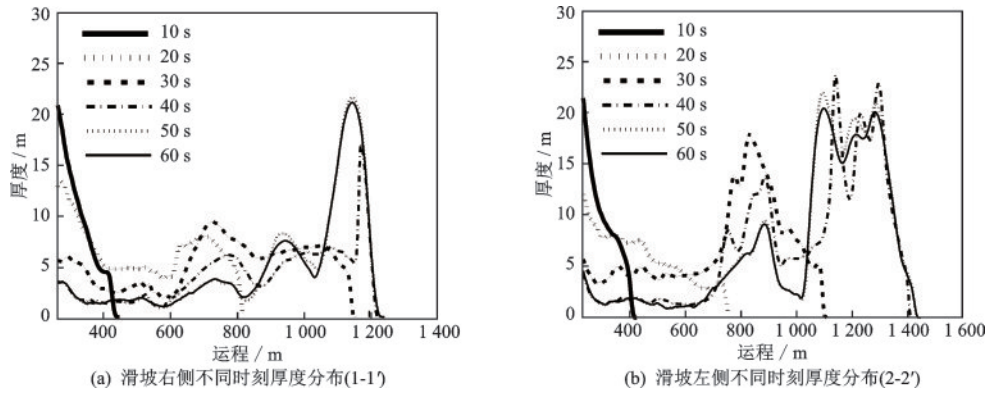


图7 水城滑坡不同时刻厚度分布

Fig.7 The thickness distribution map at different moments of the Shuicheng landslide

3.2 滑坡运动速度特征

滑坡的运动速度的预测历来是滑坡减灾防灾

的重要内容,而运动地形条件制约着滑坡运动速度和距离分布^[26]。各时刻速度随时间分布如图8所示。

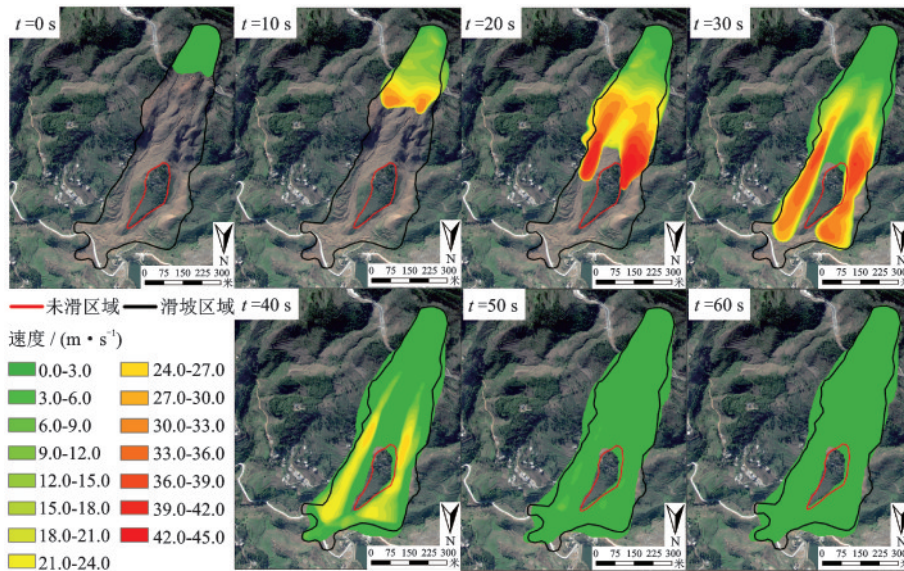


图8 水城滑坡不同时刻运动速度分布

Fig.8 Snapshots of the computed flow velocities contours of the Shuicheng landslide

与其他的高速远程滑坡不同,水城滑坡地形由沟谷型和阶梯型两种类型组成,滑坡区域内中部地形为阶梯型,两侧地形为沟谷型。为揭示地形对水城滑坡速度演化的影响,提取左右两侧滑坡体前缘运动速度进行分析。如图9所示,滑坡体从剪出口滑出后进入加速运动区,运动了约450 m前缘运动速度就达到了最大值,左右两侧前缘最大运动速度分别为42 m/s和41 m/s,整体来说,左右两侧滑坡体运动规律特征大体一致。两侧主要的差异在于400~600 m和900~1 000 m水平距离范围内(图9(a)、(b))。一方面,在水平运动距离为400~600 m

范围内时,左侧滑坡体线性加速,而右侧滑坡体在此范围内属于持速阶段,主要原因在于400 m左右范围区间左侧地形坡度由缓变陡做抛射运动,速度快速增加,右侧地形坡度则由陡变缓,对地面进行撞击后沿着稳定的坡度地形做持速运动,运动至600 m处时地形坡度有由缓变陡的趋势,使得速度继续增加到最大值。另一方面,在水平运动距离为900~1 000 m时,右侧滑坡体线性减速,但左侧滑坡体前缘速度具有突降的特征,其原因在于900 m处时滑坡体撞击前方突出地形,部分前缘滑坡体越过山包进行堆积,而另一部分滑坡体运动方向发生

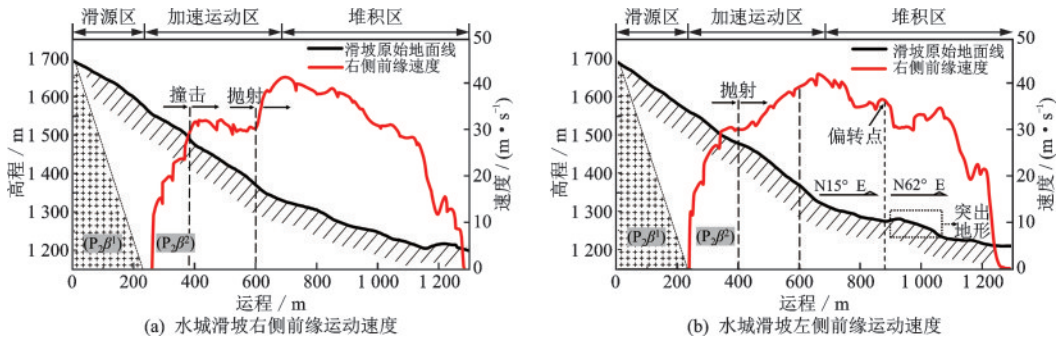


图9 水城滑坡前缘运动速度

Fig.9 The velocity of the front edge of the Shuicheng landslide

偏转,导致能量损耗,速度突降,进行短暂的持续运动后,在后缘物质能量传递作用下,速度又有所增加。

综上所述,偏转角和地形坡度的变化是不可忽视的外在因素,若偏转角不存在,滑坡体将会运动更远距离,说明沟谷偏转角能有效控制滑坡运动速度和运动距离,设置偏转引流沟能起到减灾作用。同时,在一定水平范围内,两侧地形坡度的差异使得左侧加速更快,最大前缘速度更大。

3.3 滑坡运动能量特征

致灾强度的大小可通过最大运动速度来衡量,而物体的运动能量由速度和体积确定,根据水城滑坡的运动厚度和速度,计算0~60 s时间段内滑体经过每个网格记录的最大动能(图10)。对于最大运动能量的数据的提取,若直接将整个时间历程中的最大运动厚度和最大运动速度带入动能公式中计算,会导致计算结果偏大,因为最大运动厚度和最大运动速度往往发生在不同的时刻。因此,利用Massflow统计 hv^2max 的功能(h 为厚度, v 为运动速度),将统计结果导入至GIS中,利用栅格计算器功能在此基础上乘以重力加速度和单位网格面积,得到单位网格上的最大运动能量。

为定量分析左右两侧运动能量的变化特征,两侧动能沿运程演变数据如图11所示。受运动地形和体积的作用,左侧最大运动能量分布在分流后的沟谷内,右侧最大运动能量分布在分流前,左侧和右侧的最大动能分别是 1.75×10^6 J和 8.5×10^5 J。滑源区滑坡体滑动体积分布较均匀,在滑坡启动时刻,滑坡体的重力势能瞬间转化为动能,此时的动能大小主要受体积控制,两侧动能变化规律及大小

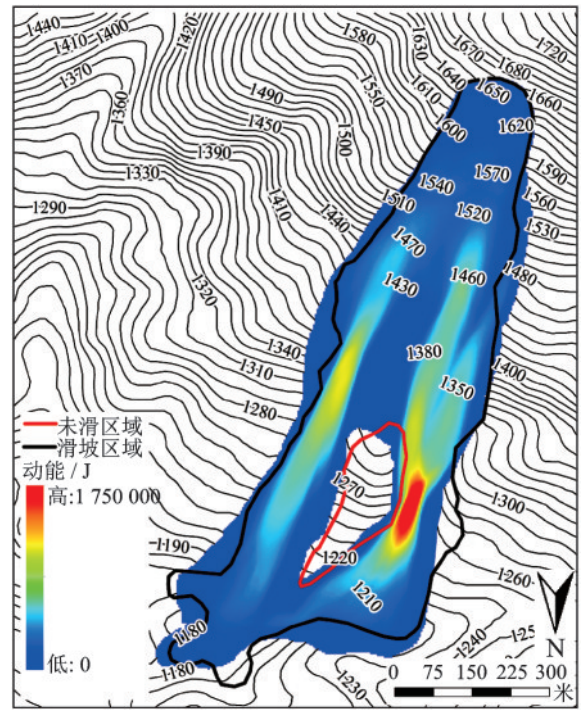


图10 水城滑坡最大动能分布

Fig.10 Maximum kinetic energy distribution map of the Shuicheng landslide

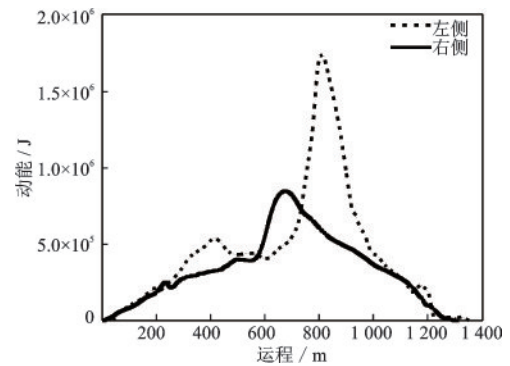


图11 水城滑坡左右两侧动能对比(左右侧剖面位置同上)

Fig.11 Comparison of kinetic energy on the left and right sides of the Shuicheng landslide (The position of the profile on the left and right sides is the same as above)

基本一致;结合图9(a)、图9(b)可知,在加速运动区,左侧滑坡体速度在波动中持续上升,而右侧滑坡体在加速后进行短距离的持续运动,同时观察到右侧动能在250~600 m左右总是低于左侧动能,说明该阶段速度对动能大小的控制作用占主导地位;在堆积区阶段,左右两侧运动速度的减小速率相差不大,但左侧动能的最大值远远大于右侧,是由于左侧沟谷内滑坡体运动体积远大于右侧所致(图6中 $t=30$ s时刻)。

3.4 滑坡损毁和掩埋建筑区动力分析

滑坡的运动速度和运动厚度决定了滑坡的致灾强度,是灾难性高位滑坡导致的严重人员伤亡和失踪的关键参数。为揭示水城滑坡岩土体抵达山区建筑时的致灾强度,选取滑坡体抵达建筑分布区的时间分布,分析滑坡对建筑损毁和掩埋的速度和厚度分布特征。

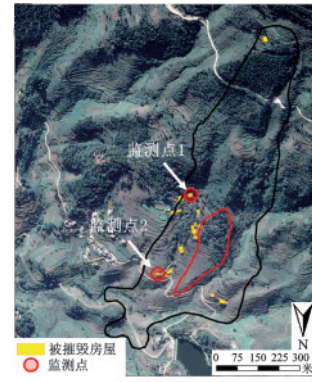
根据水城滑坡发生前的影像资料,被损毁和掩埋的山区建筑主要分布于右侧沟谷区域。因此,确定位于右侧沟谷最上部和最下部的建筑为监测点1和监测点2(图12(a))。数值模拟分析的结果表明(图12(b)和(c)),滑坡从启动并到达监测点1时只用时17 s,随后运动8 s后到达监测点2,房屋聚集区域从滑坡启动到完全被掩埋只用时25 s。在18 s时,监测点1速度达到最大值为41 m/s,在28 s时,监测点2速度达到最大值为33 m/s(图13)。滑坡的运动厚度分布显示(图14),监测点1和监测点2的最大运动厚度分别为9 m和7 m。两个监测点在52 s之后厚度基本没有变化。

目前关于滑坡碎屑流冲击力计算模型还不太成熟,现根据已有的厚度和速度数据,利用铁二院推荐西南地区泥石流整体冲击力经验公式对水城滑坡建筑物所受冲击力进行估算^[27-28],该公式常用于桥墩冲击力计算。

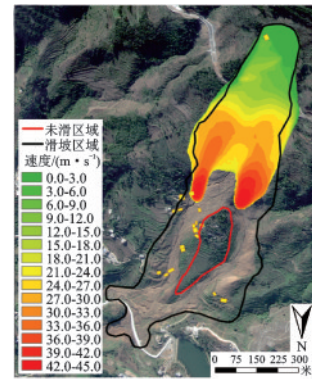
$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (9)$$

式中, δ 为整体冲击力(kPa); λ 为结构物形状系数(建筑物为圆形时 λ 取1,为矩形时取1.33,为方形时取1.47); γ_c 为容重(kN/m^3); g 为重力加速度(一般取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$); V_c 为运动速度(m/s); α 为结构受力面与冲击压力方向夹角(度)。

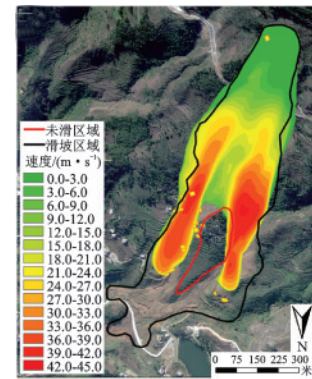
其中, λ 取1.33,通过换算 γ_c 为 $26.46 \text{ kN}/\text{m}^3$,根据监测点1和监测点2前方区域的平均坡度,确定



(a) 监测点1、2位置示意



(b) 17 s时滑坡体运动速度分布



(c) 25 s时滑坡体运动速度分布

图12 监测点位置

Fig.12 Distribution map of monitoring points locations

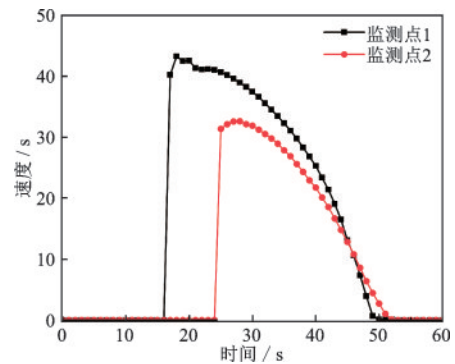


图13 监测点速度—时间关系

Fig.13 Speed-time relationship diagram of monitoring points

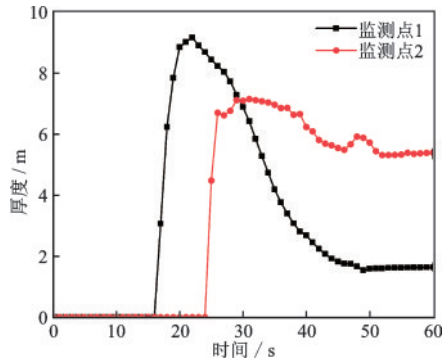


图14 监测点厚度—时间关系

Fig.14 Thickness-time relationship diagram of monitoring points

结构受力面与冲击压力方向夹角 $\alpha_1=30^\circ$ 、 $\alpha_2=16^\circ$ 。冲击力计算结果如图15所示。建筑物是否损毁由最大冲击力决定,从冲击力演变规律可看出冲击力值瞬间增大,建筑物在极短的时间内被冲毁掩埋。监测点1最大冲击力为3 346 kPa,监测点2最大冲击力为1 049 kPa,而当冲击力超过100 kPa时建筑会完全被摧毁^[29],由此可见整个水城滑坡堆积区域的冲击力都远大于山区农村房屋建筑所能承受的荷载极值,现有的山区农房建筑不能抵御高速滑坡的冲击损毁。

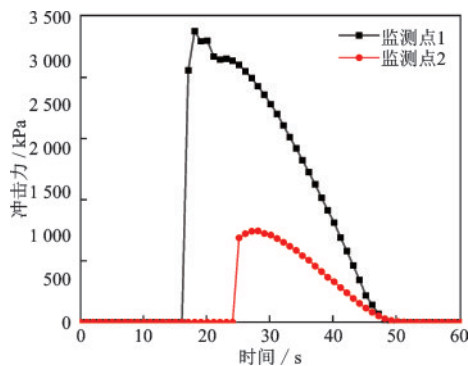


图15 监测点冲击力—时间关系

Fig.15 Impact-time relationship diagram of monitoring points

4 结 论

运用 Massflow 数值模型重现水城滑坡随时空演变过程,分析模拟结果得到以下结论:

(1) 运用库伦摩擦模型可有效地模拟水城滑坡的整个运动过程。孔隙水压力系数和基底摩擦角是确定滑坡运动距离和致灾范围的关键参数。模拟结果表明当基底摩擦角和孔隙水压力系数分别

为 20° 和 0.4 时,水城滑坡的运动距离与致灾范围与滑坡灾害的实际特征基本一致。

(2) 模拟结果表明,水城滑坡运动时长约为 60 s,滑坡前缘最大运动速度为 42 m/s,左侧主滑方向上滑坡体前缘厚度分布呈现“双峰”特征,滑坡最大堆积厚度为 22 m。左侧和右侧沟谷内的最大动能分别为 1.75×10^6 J 和 8.5×10^5 J,地形作用导致滑坡体体积和运动速度差异是影响两侧能量差异的主要因素。

(3) 建筑物监测点处不同时刻滑体坡对山区房屋建筑损毁和掩埋的运动速度大于 30 m/s,最大运动厚度大于 6 m,即两层山区农房建筑高度。监测点 1、2 最大冲击力估算值分别为 3 346 kPa 和 1 049 kPa,远大于山区农村房屋建筑所能承受的荷载极值。

(4) 根据水城滑坡运动厚度、运动速度、运动能量在时程和运程上的分布演化表明,研究区房屋建筑分布主要位于高运动速度、高致灾强度和大于建筑高度的运动厚度区域,是滑坡导致严重人员伤亡和失踪的主要原因。

参考文献:

- [1] 刘忠玉,马崇武,苗天德,等.高速滑坡远程预测的块体运动模型[J].岩石力学与工程学报,2000,19(6):742-746.
Liu Z Y, Ma C W, Miao T D, et al. Block motion model for remote prediction of high-speed landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(6):742-746.(in Chinese)
- [2] 殷跃平,朱继良,杨胜元.贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究[J].工程地质学报,2010,18(4):445-454.
Yin Y P, Zhu J L, Yang S Y. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010,18(4):445-454.(in Chinese)
- [3] 殷志强,徐永强,赵无忌.四川都江堰三溪村“7·10”高位山体滑坡研究[J].工程地质学报,2014,22(2):309-318.
Yin Z Q, Xu Y Q, Zhao W J. Sanxi village landslide in Dujiangyan, Sichuan Province on July 10, 2013[J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(2):309-318.(in Chinese)
- [4] 甘建军,樊俊辉,唐春,等.浙江遂昌苏村滑坡基本特征与成因机理分析[J].灾害学,2017,32(4):73-78.
Gan J J, Fan J H, Tang C, et al. Sucun landslide in

- Suichang County of Zhejiang Province: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 73-78. (in Chinese)
- [5] 许强,李为乐,董秀军,等.四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2612-2628.
Xu Q, Li W L, Dong X J, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2612-2628. (in Chinese)
- [6] 张明,殷跃平,吴树仁,等.高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 805-817.
Zhang M, Yin Y P, Wu S R, et al. Development status and prospects of studies on kinematics long run-out rock avalanches[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 805-817. (in Chinese)
- [7] 王玉峰,程谦恭,朱圻.汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1089-1106.
Wang Y F, Cheng Q G, Zhu Q. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1089-1106. (in Chinese)
- [8] 赵晓彦,胡厚田,齐明柱.云南头寨沟大型岩质高速滑坡碰撞模型试验[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 99-103.
Zhao X Y, Hu H T, Qi M Z. Collision model test of large-scale high-speed rock landslide in Touzhaigou, Yunnan[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 99-103. (in Chinese)
- [9] 杨龙伟,魏云杰,王文沛,等.新疆伊宁县喀拉亚杂奇滑坡动力学特征研究[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(5): 699-705.
Yang L W, Wei Y J, Wang W P, et al. Research on dynamic characteristics of the KalaYagaqi Landslide in Yining County, Xinjiang[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(5): 699-705. (in Chinese)
- [10] Scaringi G, Fan X M, Xu Q, et al. Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent Xinmo landslide (Sichuan, China)[J]. *Landslides*, 2018, 15(7): 1359-1375.
- [11] Ouyang C J, Zhou K Q, Xu Q, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China[J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 705-718.
- [12] Fan X Y, Tang J J, Tian S J, et al. Rainfall-induced rapid and long-runout catastrophic landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(2): 2161-2171.
- [13] 郑光,许强,刘秀伟,等.2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 541-556.
Zheng G, Xu Q, Liu X W, et al. The Jichang landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 541-556. (in Chinese)
- [14] Li H B, Xu Y R, Zhou J W, et al. Preliminary analyses of a catastrophic landslide occurred on July 23, 2019, in Guizhou Province, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(3): 719-724.
- [15] Ouyang C J, He S M, Xu Q, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain[J]. *Computers and Geosciences*, 2013, 52(MAR.): 1-10.
- [16] Ouyang C J, Zhao W, An H C, et al. Early identification and dynamic processes of ridge-top rockslides: implications from the Su Village landslide in Suichang County, Zhejiang Province, China[J]. *Landslides*, 2019, 16(4): 799-813.
- [17] Savage S B, Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199(2697): 177-215.
- [18] McDougall S, Hungr O. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(5): 1437-1448.
- [19] 周凯琦.基于单层单相流和多层多相流的灾害动力学数值模拟[D].武汉:华中科技大学, 2017.
Zhou K Q. Numerical simulation of disaster dynamics based on single-layer single-phase flow and multilayer multi-phase flow[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] Gao Y, Li B, Gao H Y, et al. Dynamic characteristics of high-elevation and long-runout landslides in the Emeishan basalt area: a case study of the Shuicheng "7.23" landslide in Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(7): 1663-1677.
- [21] 李华,史文兵,朱要强,等.贵州省水城县"7·23"灾难性滑坡形成机制研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(6): 188-198.
Li H, Shi W B, Zhu Y Q, et al. Study on the formation mechanism of "July 23" catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China[J]. *Journal*

- of Natural Disasters, 2020, 29(6):188-198.(in Chinese)
- [22] Guo J, Yi S J, Yin Y Z, et al. The effect of topography on landslide kinematics: a case study of the Jichang town landslide in Guizhou, China[J]. Landslides, 2020, 17(4):959-973.
- [23] Zhang Y B, Xing A G, Jin K P, et al. Investigation and dynamic analyses of rockslide-induced debris avalanche in Shuicheng, Guizhou, China[J]. Landslides, 2020, 17(9):2189-2203.
- [24] 周琪, 许强, 周书, 等. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究——以黑方台陈家8#滑坡为例[J]. 山地学报, 2019, 37(4):528-537.
Zhou Q, Xu Q, Zhou S, et al. Movement process of abrupt loess flowslide based on numerical simulation——a case study of Chenjia 8# on the Heifengtai Terrace[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 37(4):528-537.(in Chinese)
- [25] 周书. 基于InSAR技术和深度积分方法的潜在大型滑坡危害性评估[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
Zhou S. InSAR technique and depth-integrated method coupled model for potential damage area assessment of large-scale landslide[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.(in Chinese)
- [26] 李小琴, 富海鹰, 张迎宾, 等. 地形起伏对滑坡运动的影响规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6):867-877.
- Li X Q, Fu H Y, Zhang Y B, et al. Study on the influence of topography on landslide mobility[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6):867-877.(in Chinese)
- [27] 丁邦政. 基于GIS和Massflow仿真的尾矿库溃坝危害下的桥梁风险评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Ding B Z. Bridge risk assessment under tailings dam failure hazard with GIS and Massflow simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.(in Chinese)
- [28] 梅涛, 肖盛燮. 桥墩受泥石流流破坏机理分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(8):151-152.
Mei T, Xiao S X. Mechanism analysis of bridge piers damaged by debris flow[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(8):151-152.(in Chinese)
- [29] 董远峰, 任敬, 周礼. 基于滑坡动力过程模拟的危险性评价方法——以贵州省思南滑坡为例[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(1):26-34.
Dong Y F, Ren J, Zhou L. Risk assessment method based on landslide dynamic process simulation: a case study of Sinan landslide in Guizhou Province[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 55(1):26-34.(in Chinese)

(本文编辑:周小潭)