

引用格式: 吴伟乐, 贺凯, 高杨, 等, 2022. 强降雨条件下碎屑岩滑坡远程运动模拟分析: 以牛儿湾滑坡为例 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1115–1126. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.20222833

Citation: WU W L, HE K, GAO Y, et al., 2022. Long-runout fluidization disaster simulation analysis of elastic landslide under heavy rainfall: A case study of the Niuerwan landslide [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1115–1126. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.20222833

强降雨条件下碎屑岩滑坡远程运动模拟分析——以牛儿湾滑坡为例

吴伟乐^{1,2}, 贺 凯³, 高 杨^{2,3,4}, 李 滨^{2,3,4}, 刘鹏飞⁵
WU Weile^{1,2}, HE Kai³, GAO Yang^{2,3,4}, LI Bin^{2,3,4}, LIU Pengfei⁵

- 1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
- 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
- 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
- 4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
- 5. 重庆市地质环境监测总站, 重庆 401122

- 1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
- 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
- 4. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;
- 5. Chongqing Institute of Geological Environment Monitoring, Chongqing 401122, China

Long-runout fluidization disaster simulation analysis of elastic landslide under heavy rainfall:
A case study of the Niuerwan landslide

Abstract: The frequent occurrence of remote landslide disasters under heavy rainfall in the mountainous area with sand-mudstone strata in southwest China is a critical issue to be solved in disaster prevention and mitigation. Taking the July 13, 2020 Niuerwan landslide in Wulong, Chongqing as an example, technical means including UAV image, field investigation, geological condition analysis, and PFC^{3D} simulation were used to study the long-runout motion model of flowslide under heavy rainfall. The results show that the unique stratigraphic structure (Quaternary residual slope soil in the upper part and sand-mudstone in the lower part) is the root cause of the landslide instability and long-runout fluidization movement. Heavy rainfall is the key factor in causing the deep destabilization and overall decline of the landslide, and it also leads to the long-distance movement of the upper saturated residual soil. The long-runout fluidization disaster model of bedding landslide shows the characteristics of overall sliding of the lower layer, mixing of coarse and fine particles of the middle layer, and saturation fluidization in the upper layer. The long-runout fluidization process can be divided into three stages: the overall instability, the mixed acceleration, and the fluidization accumulation. Based on the above research, it is concluded that the investigation and prediction process of long-runout fluidization landslide in the mountainous area with sand-mudstone strata should be based on this particular disaster model to provide a quantitative scientific basis for disaster prevention and mitigation.

Keywords: Niuerwan landslide; fluidization; high-elevation and long-runout; bedding landslide

摘 要: 中国西南砂泥岩地层山区在强降雨条件下频发远程滑坡灾害, 是防灾减灾领域亟待解决的关键

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (42177172); 国家自然科学基金青年基金项目 (41907257)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42177172) and the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No.41907257)

第一作者简介: 吴伟乐 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: 875971509@qq.com

通讯作者: 贺凯 (1986—), 男, 副研究员, 主要从事地质灾害防治研究工作。E-mail: 492644728@qq.com

收稿日期: 2022-06-24; **修回日期:** 2022-09-28; **责任编辑:** 王婧

问题。以 2020 年 7 月 13 日重庆武隆牛儿湾滑坡为例,通过无人机航飞、野外调查和地质条件分析等手段,运用 PFC^{3D} 模拟,对中国西南砂泥岩地层山区强降雨条件下流化滑坡远程运动成灾模式开展研究。研究结果显示:独特的地层结构(上部为第四系残坡积土,下部为砂泥岩)是导致滑坡顺层失稳,并远程流化运动的根本原因;强降雨条件是导致滑坡深层失稳、整体下滑,同时使表层残破积土层饱水流化远程运动的关键影响因素;顺层滑坡远程流化成灾模式主要表现出下层整体滑移、中层粗细颗粒混合和上层饱水流化的特征,流化过程可分为整体高位失稳—混合加速—运动流化堆积三个阶段。基于以上研究,认为砂泥岩地层山区的远程流化滑坡风险调查与预测过程应当充分基于滑体远程流化运动的成灾特点进行调查与评价,以此为防灾减灾提供定量化科学依据。

关键词: 牛儿湾滑坡;流态化;高位远程;顺层滑坡

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 06-1115-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222833

0 引言

全球气候变化对极端天气事件(极端降雨、气温升高、强风和洪水灾害)的影响尤为强烈,增加了地质灾害发生的风险(高杨等,2017),尤其是强降雨条件下的高位远程滑坡灾害频发,给人类的生命和财产安全带来了极大威胁。高位远程滑坡是从高陡斜坡凌空剪出、加速下坠的一类滑坡,常常具有较大的能量,在运动过程中易转化为泥石流或碎屑流(许强等,2009;殷跃平,2010;殷跃平等,2017)。中国西南砂泥岩地层山区由暴雨灾害引发了多起高位远程地质灾害事件,如 2014 年 9 月初渝东北地区发生强降雨事件,导致多地多处发生远程滑坡(Li et al., 2022),主要有重庆奉节无山坪滑坡、咸池水库滑坡、白果寨滑坡。国内学者对强降雨型高位远程岩质滑坡的成灾模式和远程运动机理开展了相关研究(许强,2010;高杨等,2020, 2022;高浩源等,2020;李壮等,2020),认为强降雨是导致滑坡远程运动的关键因素。也有学者对顺层滑坡开展了系统的研究,余飞等(2005)采用数值模拟方法,展现了顺层滑坡的渐进破坏过程;邹宗兴等(2012)将顺层岩质滑坡的变形破坏地质力学模式分为了两类,并给出了相应的稳定性计算方法;龙建辉等(2019)探讨了含有软弱夹层的顺层岩质滑坡的变形破坏规律;胡乐等(2021)通过离心机模型实验,探索了硬土软岩型滑坡沿顺层破坏时的运动特点。滑坡运动过程中的动能保持和基底摩擦阻力是影响滑坡远距离运动本质条件,不少学者提出了诸如气垫效应、流化效应和液化效应等观点,

主要从摩擦阻力下降的角度解释了其远程致灾的现象(Buss et al., 1881; Kent, 1966; Sassa, 1989; Hungr, 1995; Davies et al., 1999; 邢爱国等, 2004; 邢爱国和殷跃平, 2009; De Blasio and Crosta, 2015; Lai et al., 2017; Gao et al., 2022)。

随着计算机技术的发展,数值模拟技术因其成本低、操作方便、可重复试验等优点,成为了反演分析滑坡运动过程和动力学机制的最为高效的手段之一。基于等效流体理论以及非连续力学方法,对滑坡运动的数值模拟主要包括连续介质算法以及离散元算法。①连续介质算法:如 DAN-W、SPH^{2D}、FIAC^{3D} 等基于剖面的数值模拟技术,把复杂的滑坡体看成等效流体,通过不同的流变模型确定基底的摩擦阻力,可以较好地模拟滑坡的运动速度和堆积厚度(Hungr, 1995; Evans, 2001; Sassa et al., 2004, 2010; 张远娇等, 2012; Gao et al., 2017, 2019, 2020; 张艳玲等, 2021);②离散元算法:如 PFC、EDEM 和 MatDEM 等计算方法,通过设置不同的接触类型和摩擦参数,可以有效地模拟崩塌、碎屑流等大变形问题。如张龙等(2012)利用 PFC^{3D} 软件分析了摩擦因数与黏结强度的变化对鸡尾山滑坡的运动、堆积特征的影响。孟恒羽等(2022)利用离散元软件 PFC^{3D},对山阳滑坡运动全过程进行模拟,再现了滑坡体失稳后,在重力作用下沿视倾向起动、碰撞和堆积的全过程。

牛儿湾滑坡位于重庆市武隆区白马镇鱼光村,在持续降雨影响下,滑体于 2020 年 7 月 13 日沿层面发生整体滑移失稳,造成 8 栋房屋倒塌、S529 省道及页岩气输气管道损毁。目前仍有约 $273.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 滑体处于基本稳定状态,若遭遇强降雨天

气, 极有可能再次失稳下滑, 严重威胁居民房屋、S529 省道、村道、高压线铁塔等设施的安全。文章基于对牛儿湾滑坡的详细野外工程地质调查与分析, 系统阐述了滑坡体运动堆积特征, 并利用离散元软件 PFC^{3D} 还原了牛儿湾滑坡运动过程及堆积特征, 揭示了砂泥岩地层山区滑坡整体失稳和远程流化运动的成灾模式, 认为在砂泥岩地层山区的远程流化滑坡风险调查与预测过程中, 应当充分基于滑体远程流化运动的成灾特点进行调查与评价, 为防灾减灾工作提供定量化科学依据。

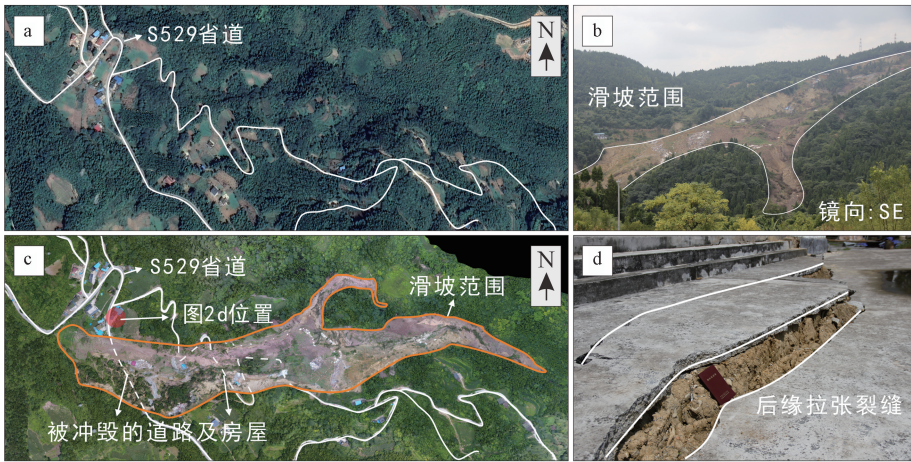
1 滑坡地质环境条件

1.1 自然地理

研究区位于重庆市武隆区白马镇, 经纬度为 107°30′41.82″E, 29°23′59.47″N, 属于低山地貌区(图 1)。研究区西侧和西南侧为山顶, 总体为西高东低, 北部地形转折, 形成小山脊, 继续往北转折为冲沟, 向东延伸至研究区东部(滑坡前缘)(图 2)。目前已滑移区地势较周边低, 形成凹槽。



图 1 研究区地理位置图
Fig. 1 Geographical location of the study area



a—滑前遥感影像; b—滑坡现场照片; c—滑后遥感影像; d—滑坡后缘房屋拉张裂缝

图 2 牛儿湾滑坡遥感影像图及现场照片

Fig. 2 Remote sensing images and pictures of the Niuerwan landslide

(a) Remote sensing image before the failure; (b) Scene of the landslide; (c) Remote sensing image after the failure; (d) Tensile fracture

除已滑移区外,研究区总体为上缓下陡,上部地形坡角一般为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,下部地形坡角一般为 $20^{\circ}\sim 28^{\circ}$,整体坡向约 115° ;最高点位于西侧,高程约为 $625\sim 666\text{ m}$,最低点位于下部前缘堆积体所处冲沟,高程约为 $334\sim 339\text{ m}$,相对高差约 $291\sim 327\text{ m}$ 。

1.2 地质构造及地层岩性

研究区位于扬子准地台四川台坳川东南坳褶

带南端与川黔经向构造带交汇部位,主控构造为白马向斜,轴线位于白马镇以西。向斜南段轴向为南西向;中段轴向由南西向转为北北东向;北段轴向为北北东向。由于研究区处于复杂的断裂和褶皱的交汇地带,强烈构造活动使得区内岩体较为破碎(图3)。

研究区内主要出露的岩性由新到老依次为:第四系残坡积层(Q_4^{el+dl}),主要为含碎石黏土,母

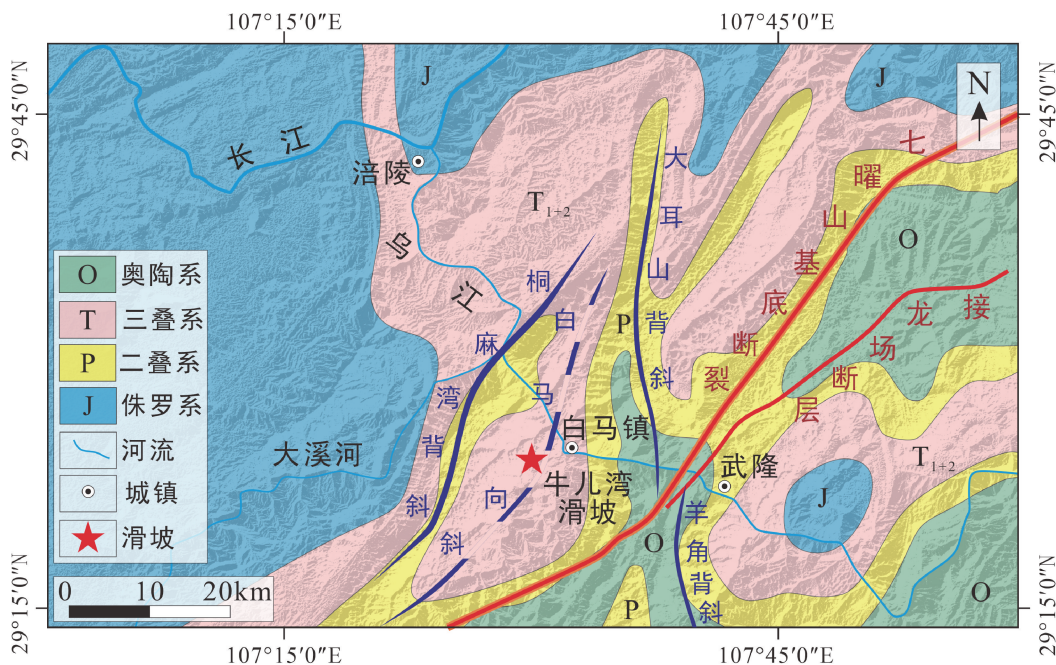


图3 研究区区域地质图

Fig.3 Regional geological map of the study area

岩主要为砂质泥岩、页岩、泥灰岩,磨圆度差,呈棱角状、次棱角状,厚度 $0\sim 9.30\text{ m}$;三叠系中统巴东组(T_2b),以砂质泥岩为主,并夹有钙质页岩及泥灰岩薄层,该层为软岩,风化程度高,抗剪强度低,易产生崩塌或滑动,为滑坡的形成提供了物质基础。滑体下部基岩发育有多组结构面,其中三组主要的结构面产状分别为 $300^{\circ}\sim 338^{\circ}\angle 62^{\circ}\sim 86^{\circ}$ (F_1), $30^{\circ}\sim 42^{\circ}\angle 71^{\circ}\sim 88^{\circ}$ (F_2), $115^{\circ}\sim 150^{\circ}\angle 10^{\circ}\sim 38^{\circ}$ (F_3)。其中 F_3 为地层产状且为滑坡的主控结构面, F_1 和 F_2 为一组共轭剪节理,它们与 F_3 一同将基岩切割成破碎的块状岩体(图4)。

1.3 气象水文

武隆区属典型的亚热带湿润季风气候,降雨充沛,多集中在 $5\sim 10$ 月,年平均降水量 1100.1 mm ,月均降水量见图5。研究区为斜坡地形,总体西高东低,有利于地表水的排泄,滑坡区域内无常年

地表水,主要通过冲沟及公路排水沟进行地表水的排泄。

地表水易向冲沟汇集,且区内岩土体裂隙发育,故地表水易向岩土体中下渗;同时,由于部分路段的公路排水沟直接排向路边岩土体中,也极易造成岩土体饱水。在这样不良的排水条件下,持续性降雨成为该滑坡失稳的重要诱因,松散的残坡积层及发育的基岩裂隙,导致雨水大量入渗,不但加大了滑体容重,还削弱了岩土体的抗剪强度,极大地降低了滑坡稳定性。

2 滑坡运动特征

根据滑坡发生前后的遥感图对比和现场调查分析显示,在持续的强降雨条件下,滑坡发生整体失稳,随后滑体前部开始下滑。失去前部的阻挡,滑体中后部随之下滑,在运动一段距离后,

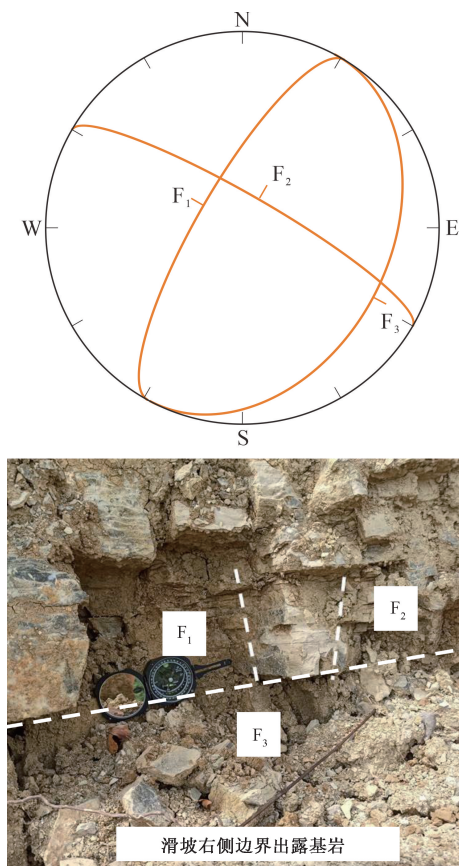


图 4 滑坡岩体赤平投影及出露基岩

Fig. 4 Stereographic projection of the rock mass and outcropping of the bedrock

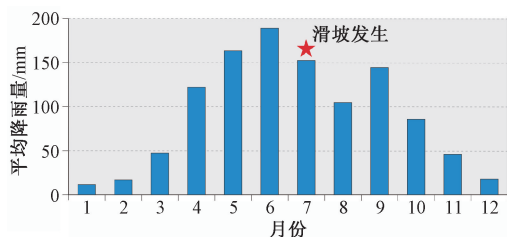


图 5 研究区多年月均降雨量图

Fig. 5 Monthly rainfall in the study area

受山脊地形影响,滑体分流为 $N45^{\circ}E$ 和 $N81^{\circ}E$ 两部分,最大运动距离约 1.4 km,前缘呈尖灭状。滑坡面积约为 $13.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体平均厚度约为 11.08 m,体积约为 $147.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 6,图 7),造成 8 栋房屋倒塌、S529 省道及页岩气输气管道损毁。根据滑坡的运动堆积特征,将滑坡分为了滑源区、主堆积区和碎屑流堆积区(图 6)。

2.1 滑源区

滑源区地形坡度约 16° ，滑体基岩为三叠系巴东组砂质泥岩，表面覆盖厚度约 $0\sim 9.30\text{ m}$ 的第四系残坡积物。滑源区平面形态呈长条带状，宽约 $150\sim 200\text{ m}$ ，长约 600 m 。滑坡后缘高程约 620 m ，剪出口高程约 450 m ，高差 170 m ，面积约 $6\times 10^4\text{ m}^2$ ；滑体厚度 $10\sim 30\text{ m}$ ，体积约 $147.5\times 10^4\text{ m}^3$ 。滑体从剪出口剪出，整体下错约 $10\sim 20\text{ m}$ ，滑动方向约为

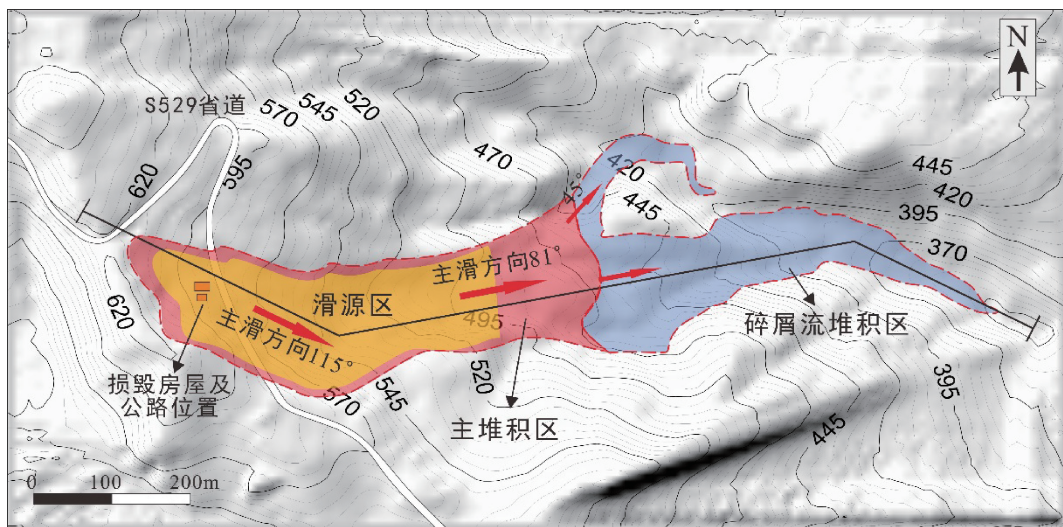


图 6 牛儿湾滑坡平面图

Fig. 6 Plan map of the Niuerwan landslide

N115°E, 与岩层产状接近, 后因地形影响滑动方向偏转为 N81°E, 下部基岩发生破碎但仍保持一定的结构性, 上部松散且饱水的残坡积层迅速解体形成碎屑流向下流动。

2.2 主堆积区

主堆积区为滑坡堆积体的主要场所之一,范围约 $7 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑坡失稳后, 约有 $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑体下滑形成远距离运动, 最远运动距离约 1400 m,

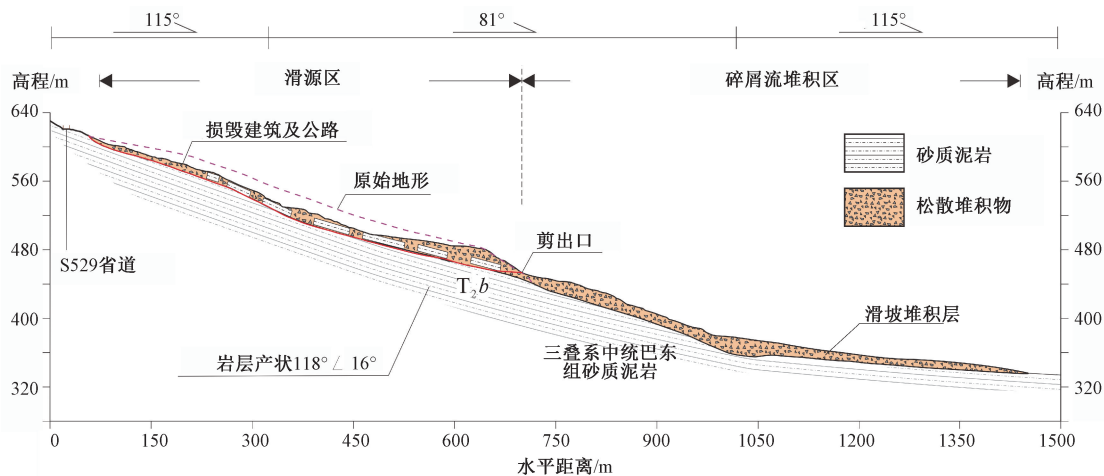


图 7 牛儿湾滑坡剖面图
Fig. 7 Profile map of the Niuerwan landslide

仍有约 $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 滑体留在滑源区范围内形成堆积。堆积体中可见被破坏的房屋和公路（图 1），成分为碎石土，母岩主要为砂质泥岩。该区域已经发生滑动，土体松散，在暴雨情况下，堆积体有发生进一步滑动和形成泥石流的可能。

2.3 碎屑流堆积区

碎屑流沿主滑方向（N81°E）运动过程中，受凸起的山脊地形影响，碎屑流分流成两部分，分别朝 N45°E 和 N81°E 方向沿沟谷运动。其中大部分滑体沿 N81°E 方向运动，受山谷地形变窄影响，滑体动能降低、流速变慢并逐渐堆积，前缘呈现尖灭状；小部分滑体沿 N45°E 方向运动，越过了凸起的山脊，抛洒于此处形成堆积。整个碎屑流堆积区平面形态近似钳状，沟谷后缘高程约 450 m，前缘高程约 335 m，高差 115 m，长约 750 m，面积约 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，最大堆积厚度约 20 m。该区堆积物主要为第四系残坡积土以及砂质泥岩的松散混合物，碎石粒径明显比主堆积区中堆积物的粒径小。

3 牛儿湾滑坡运动过程数值模拟

3.1 滑坡模型建立

本次数值模拟采用 PFC^{3D} 软件，重点在于重现滑体失稳后的运动堆积过程，因此采用 PFC^{3D} 中的 ball-wall 模型进行建模，以 wall 刚性墙体作为滑面，ball 颗粒作为滑体，提高了数值模拟的计算效率。

首先，根据牛儿湾滑坡滑后 1:1000 地形图生成 wall 刚性墙体作为计算模型的边界；然后采用 generate 颗粒生成法生成 ball 颗粒模拟滑坡岩土体。

在构建滑体的过程中，将滑体概化为上下两层的特殊二元结构。滑体总厚度约 20 m，上下层颗粒厚度均按 10 m 生成两层滑体，上层颗粒采用线性接触模型模拟松散土体，下层颗粒则采用平行黏结模型模拟胶结的岩石（图 8）。

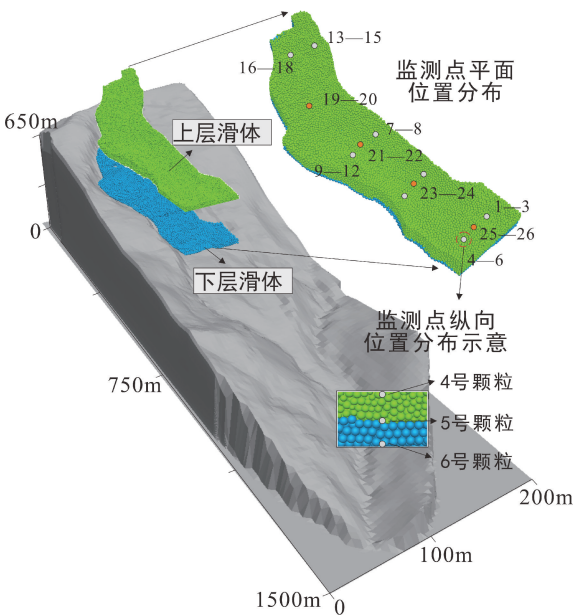


图 8 牛儿湾滑坡 PFC^{3D} 模型
Fig. 8 PFC^{3D} model of the Niuerwan landslide

3.2 模型微观参数标定

文中采用虚拟三轴实验进行参数标定，应力-应变曲线如图 9 所示，为了与模拟时较大的颗粒半径保持一致，将三轴实验试样设置为直径 50 m、高度 100 m 的圆柱形，颗粒数目约 12000 个，最小半径 $R_{\min}$ 为 1.2 m，最大半径 $R_{\max}$ 为 2 m。

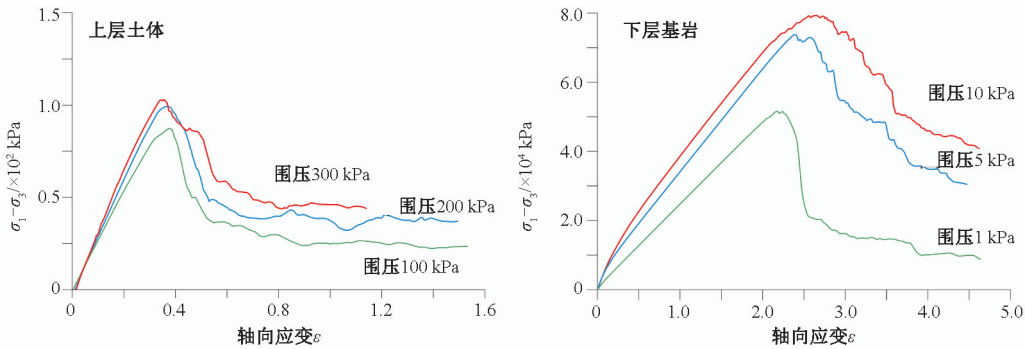


图 9 PFC^{3D} 三轴压缩试验

Fig. 9 Virtual triaxial compression test using the PFC^{3D} software

由图 9 分析知, 对于上层土体试样, 由于没有设置粘结强度, 三种围压下的峰值强度基本一致; 对于下层基岩试样, 在低围压下, 试样的抗压强度较低, 随着围压的增加, 试样的抗压强度也随之增大, 与实际情况相吻合。

将模拟结果与实际滑坡的运动特征和堆积形态进行反演对比, 经过不断的优化和调节微观参数, 最终实现模拟滑坡运动与实际运动特征基本一致。由此最终确定牛儿湾滑坡数值模拟的微观参数 (表 1)。

表 1 PFC^{3D} 模型微观参数表

Table 1 Micro-parameters for the PFC^{3D} model

上层土体 微观参数	颗粒最小半径	颗粒半径比	密度 ρ /	接触模量/	摩擦	下层基岩 微观参数	颗粒最小半径	颗粒半径比	密度 ρ /	接触模量/	摩擦
	$R_{\min}/\text{m}$	$R_{\max}/R_{\min}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	MPa	系数		$R_{\min}/\text{m}$	$R_{\max}/R_{\min}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	MPa	系数
	1.2	1.67	2300	1000	0.2		2	1	2300	1000	0.5
参数	平行黏结 模量/MPa	平行黏结 刚度比 K	法向黏结 强度/MPa	切向黏结 强度/MPa	阻尼 系数	参数	平行黏结 模量/MPa	平行黏结 刚度比 K	法向黏结 强度/MPa	切向黏结 强度/MPa	阻尼 系数
	0	0	0	0	0.37		1256	1	100	100	0.37

3.3 滑坡运动过程及堆积结果

模拟结果显示, 滑坡运动总时间约 360 s, 堆积状态与野外调查结果基本一致, 同时得益于数

值模拟的便利性, 将上下两层滑体分别建模, 便于更好地分析上下层滑体的运动堆积特征 (图 10)。

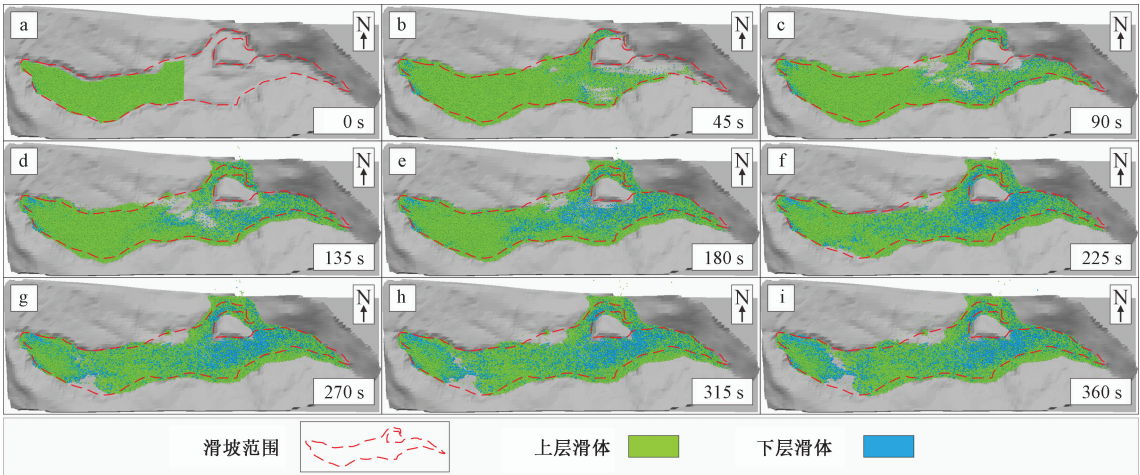


图 10 牛儿湾滑坡滑体分组运动情况图

Fig. 10 Diagrams showing the movement of the upper and lower layers of the sliding body in different time periods

由图 10 对上下层滑体进行分析可知, 上层滑体为松散的残坡积物, 受降雨影响滑体接近饱和,

当滑坡失稳后, 上层滑体迅速解体形成碎屑流, 呈流态化运动 (图 10a—10d), 大部分上层滑体都

堆积到了滑坡前缘，运动距离超 1 km；而下层滑体为强风化且节理发育的砂质泥岩，同样发生了解体的现象，并与上层滑体混合向下运动（图 10e、10f），但下层滑体仍保持有一定的结构性（图 10g—10i），并且运动距离较短，仍有大量滑体留在滑源区内。不同时间段内滑坡的运动情况如下。

0~45 s：滑坡发生整体失稳后，滑源区前部滑体从剪出口剪出，开始下滑，主滑方向为 N81°E，部分滑体最大运动速度超过 15 m/s（图 11a、11b），上层滑体发生流态化滑动，下层滑体也逐渐发生解体，两层滑体混合，形成碎屑流向下流动（图 10b）；由于运动路径上山脊的阻挡，滑体开始产生分流，大部分滑体沿 N81°E 方向继续运动，小部分滑体则沿 N45°E 方向运动。

45~135 s：滑体持续运动，分流现象更加明显，同时滑源区中后部滑体失去了前部滑体的阻挡，随之发生更大规模的下滑，但受地形坡度制约，下滑速度相对较小，大部分滑体的运动速度处于 4~6 m/s（图 11c、11d）。

135~225 s：该阶段滑体的运动更加明显，中部滑体继续以 4~10 m/s 的速度向下运动，而前部滑体受到逐渐变窄的山谷地形影响，已开始停止运动（图 11e、11f）；同时流态化特征更加明显，上层滑体持续下滑并裹挟下层滑体不断汇入到堆积区内（图 10e、10f）。

225~360 s：前部滑体已停止运动形成堆积体，后方滑体在前方堆积体的阻挡以及阻力作用下也逐渐停止运动（图 11g—11i），滑坡的最终堆积形态与实际情况较为一致。

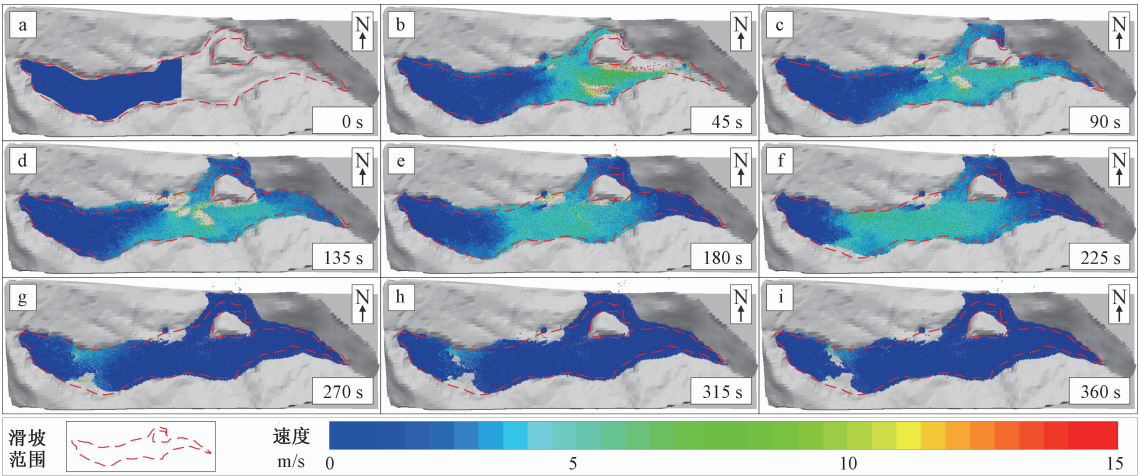


图 11 牛儿湾滑坡滑体速度分布图

Fig. 11 Velocity of the sliding body

3.4 速度曲线及位移轨迹分析

如图 8 所示，为了监测滑坡的速度和运动轨迹，在滑体前、中、后部的上层滑体、下层滑体分别设置了共 26 个监测颗粒，对其中 19—26 号颗粒进行了运动轨迹的监测（图 12），同时对滑体前部 1—6 号、中部 7—12 号和后部 13—18 号颗粒进行速度的监测（图 13）。

前部滑体的上、下两层滑体都发生了解体，混合形成碎屑流共同运动，1—6 号颗粒的运动距离基本一样，约为 435~472 m（图 12），同时运动速度变化也保持一致，最大速度约 18 m/s（图 13b）；中部滑体的 7—12 号颗粒的速度变化也基本一致，最大速度约 5 m/s（图 13c），但上层颗粒（21 号）的运动距离约 403 m，而下层颗粒（22

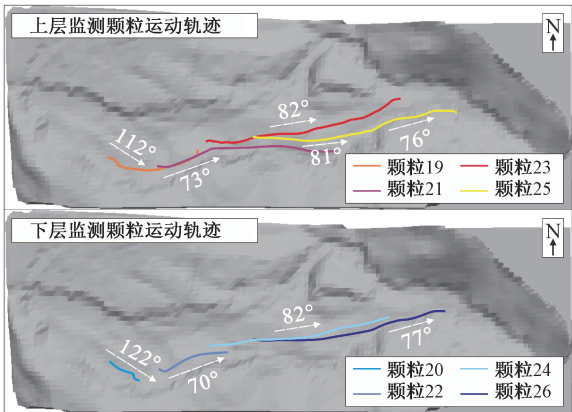
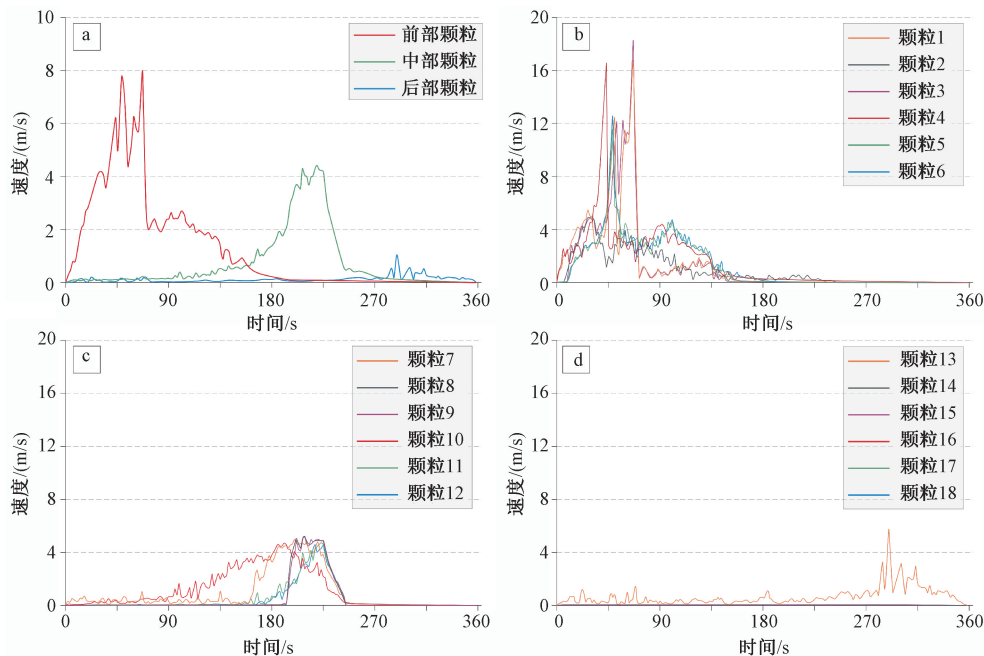


图 12 监测颗粒运动轨迹图

Fig. 12 Trajectory of specific particles

号）的运动距离仅 155 m；后部滑体只有 13 号颗



a—监测颗粒平均速度曲线；b—前部颗粒速度曲线；c—中部颗粒速度曲线；d—后部颗粒速度曲线

图 13 监测颗粒运动速度曲线图

Fig. 13 Velocity curves of the monitoring particles

(a) Average velocity curves; (b) Velocity curves of the front particles; (c) Velocity curves of the middle particles; (d) Velocity curves of the rear particles

粒的最大速度达到约 5 m/s, 14—18 号颗粒几乎没有发生运动 (图 13d), 上层颗粒 (19 号) 发生下滑, 运动距离约 200 m, 下层颗粒 (20 号) 运动距离仅 72 m。

经过以上的分析, 发现上下两层滑体的运动特征存在明显的差异, 在滑体前部, 上下两层滑体的解体破碎现象较为彻底, 形成碎屑流, 运动特征保持一致; 而滑体中后部, 上层滑体解体更加彻底, 运动距离可以达到下层滑体的 2 倍, 具有明显的流态化运动特征, 下层滑体则保持有一定的结构性, 呈现整体运动 (图 12)。滑体前中后部的运动方向也展示出了其特殊的失稳模式, 后部滑体沿 N112°E~N122°E 方向发生滑动, 与岩层倾向 (N115°E) 基本一致, 认为后部块体沿真倾向方向滑动; 而前部和中部滑体受到滑坡右侧边界山体的影响, 滑动方向则偏转为 N70°E~N82°E, 表现出了沿视倾向方向滑动的特点 (图 12)。

4 成灾模式探索讨论

牛儿湾滑坡为顺层滑坡, 地层倾角较为平缓, 滑体运动速度较典型的高位远程滑坡慢, 但该滑坡仍产生了远程运动的现象, 其远程致灾模式值

得进一步的探索与讨论。文章根据滑坡的运动、堆积特征, 提出了其远程运动的概化模式, 可分为 3 个阶段 (图 14)。

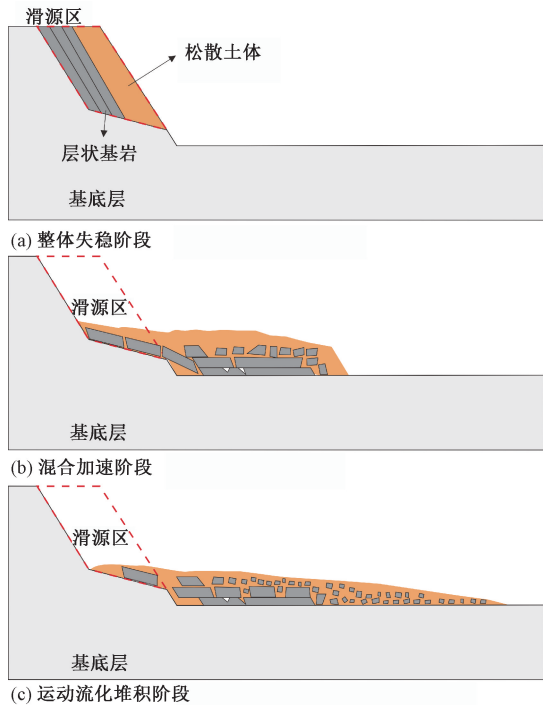


图 14 牛儿湾滑坡远程运动模式概化图

Fig. 14 Generalized model for the long-runout movement of the Niuerwan landslide

(1) 整体失稳阶段: 滑坡沿地层层面发生整体失稳, 滑源区范围较大, 势动能转换后滑体不同部位的运动速度差异较大, 前部滑体动能较大, 中后部滑体动能则相对较小。

(2) 混合加速阶段: 滑体开始解体形成碎屑流, 但上下两层性质迥异的滑体展现了不同的运动特征。下层滑体受到基底层摩擦阻力以及上覆土体的影响, 加上地形较为平缓, 没有强烈的碰撞, 保持了一定的结构性; 上层滑体为饱和的残坡积土, 受到扰动后彻底破碎形成碎屑流, 呈现出明显的流态化运动特征, 同时, 上层滑体裹挟下层滑体顶部较为破碎的块体, 逐渐形成混合碎屑流开始加速下滑。

(3) 运动流化堆积阶段: 随着滑体的进一步运动, 混合碎屑流形成远距离运动, 持续汇入下方堆积区。

5 结论

文章以牛儿湾滑坡为研究对象, 以详细的野外调查资料为基础, 对牛儿湾滑坡开展了系统的分析以及数值模拟工作, 取得以下结果。

(1) 牛儿湾滑坡运动历时 360 s, 最大速度约 18 m/s, 最大平均速度约 8 m/s, 滑坡最大运动距离约 1250 m。值得注意的是, 远距离运动的物源大部分来自上层滑体, 上层滑体的流态化运动特征大大增加了滑坡的致灾范围。

(2) 上下两层滑体的运动有明显差异。滑体前部, 上下两层滑体的解体破碎现象较为彻底, 运动特征基本一致; 而滑体中后部, 上层滑体解体相对更加彻底, 运动距离可以达到下层滑体的 2 倍, 具有明显的流态化运动特征, 下层滑体则仍保持有一定的结构性, 呈现整体运动。滑体前中后部的运动方向也展示出了其特殊的失稳模式, 后部滑体沿真倾向方向滑动, 而前部和中部滑体受到地形影响, 表现出了沿视倾向方向滑动的特点。

(3) 将牛儿湾滑坡的远程运动过程模式分为整体失稳、混合加速和运动流化堆积三个阶段, 为研究该类滑坡的远程运动模式做出一定的探索。

(4) 强降雨条件和“上土下岩”的二元结构, 造成滑坡软弱夹层地下水富集, 表层残破积土层饱水, 不但降低了岩体的抗剪强度, 同时增加了

下滑力, 是导致滑坡深层失稳整体下滑, 表层流化远程运动的关键因素。

References

- BUSS E, HEIM A, BECKER F, et al., 1881. Der Bergsturz von elm den 11. September 1881. Denkschrift [M]. Zürich J Wurtster & Cie, 1881.
- DAVIES T R, MCSAVENEY M J, HODGSON K A, 1999. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 36 (6): 1096-1110.
- DE BLASIO F V, CROSTA G B, 2015. Fragmentation and boosting of rock falls and rock avalanches [J]. Geophysical Research Letters, 42 (20): 8463-8470.
- EVANS S G, HUNGR O, CLAGUE J J, 2001. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada; implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes [J]. Engineering Geology, 61 (1): 29-51.
- GAO H Y, GAO Y, HE K, et al., 2020. Impact and scraping effects of the high-elevation, long-runout “7.23” landslide in Shuicheng, Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 39 (4): 535-546. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, LI B, FENG Z, et al., 2017. Global climate change and geological disaster response analysis [J]. Journal of Geomechanics, 23 (1): 65-77. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2017. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxiacun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Landslides, 14 (4): 1361-1374.
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2019. Post-failure behavior analysis of the Shenzhen “12.20” CDW landfill landslide [J]. Waste Management, 83: 171-183.
- GAO Y, HE K, LI Z, et al., 2020. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47 (4): 14-23. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, LI B, GAO H Y, et al., 2020. 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, 17 (7): 1663-1677.
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2022. The role of fluid drag force in the dynamic process of two-phase flow-like landslides [J]. Landslides, 19 (7): 1791-1805.
- GAO Y, YIN Y P, LI Z, et al., 2022. Study on the dynamic disintegration effect of high position and long runout rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41 (10): 1958-1970. (in Chinese with English abstract)
- HU L, XIN P, WANG T, et al., 2021. Centrifuge model tests on the near-horizontal slide of hard soil-soft rock landslides [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 73-82.
- HUNGR O, 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides,

debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 32 (4): 610-623.

KENT P E, 1966. The transport mechanism in catastrophic rock falls [J]. The Journal of Geology, 74 (1): 79-83.

LAI Z Q, VALLEJO L E, ZHOU W, et al., 2017. Collapse of granular columns with fractal particle size distribution: implications for understanding the role of small particles in granular flows [J]. Geophysical Research Letters, 44 (24): 12181-12189.

LI B, GAO Y, YIN Y P, et al., 2022. Rainstorm-induced large-scale landslides in Northeastern Chongqing, China, August 31 to September 2, 2014 [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81 (7): 271.

LI Z, GAO Y, HE K, et al., 2020. Analysis of the fluidization process of the high position and longrunout landslide in Shuicheng, Liupanshui, Guizhou Province [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 520-532. (in Chinese with English abstract)

LONG J H, REN J, ZENG F G, et al., 2019. Sliding mode and deformation law of double weak interlayer rock landslide [J]. Journal of China Coal Society, 44 (10): 3031-3040. (in Chinese with English abstract)

MENG H Y, ZHAN J W, LU Q Z, et al., 2022. Kinematics characteristics and numerical simulation analysis of “8.12” giant landslide in Shanyang county, Shaanxi province [J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1-18 [2022-06-09]. (in Chinese with English abstract)

SASSA K, 1989. Geotechnical model for the motion of landslides (Special lecture) [C] //Proceedings of the 5th international symposium on landslides. Publ Rotterdam: A A Balkema: 37-56.

SASSA K, WANG G H, FUKUOKA H, et al., 2004. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas [J]. Landslides, 1 (3): 221-235.

SASSA K, NAGAI O, SOLIDUM R, et al., 2010. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide [J]. Landslides, 7 (3): 219-236.

XING A G, GAO G Y, CHEN L Z, et al., 2004. Study on hydrodynamics mechanism of large highspeed landslide in the set-out stage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23 (4): 607-613. (in Chinese with English abstract)

XING A G, YIN Y P, 2009. Whole course analysis on hydrokinetics mechanism of Touzhai gully landslide [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 37 (4): 481-485. (in Chinese with English abstract)

XU Q, HUNAG R Q, YIN Y P, et al., 2009. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 17 (4): 433-444. (in Chinese with English abstract)

XU Q, 2010. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 18 (5): 596-608. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, 2010. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29 (2): 217-226. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, WANG W P, ZHANG N, et al., 2017. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: a case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. Geology in China, 44 (5): 827-841. (in Chinese with English abstract)

YU F, CHEN S X, YU H P, 2005. Numerical simulation study on progressive destruction and failure mechanism of bedding rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 26 (S2): 36-40, doi: 10.16285/j.rsm.2005.s2.036. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, TANG H M, XIONG C R, et al., 2012. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31 (S1): 2601-2611. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y J, XING A G, ZHU J L, 2012. Dynamics analysis of Nijuangou rockslide-debris avalanche triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 46 (10): 1665-1670. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y L, CHEN L, YAN J K, et al., 2021. Study on the catastrophic process of rapid and long run-out landslides based on DAN-W [J]. Northwestern Geology, 54 (1): 204-211. (in Chinese with English abstract)

ZOU Z X, TANG H M, XIONG C R, et al., 2012. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31 (11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

高浩源, 高杨, 贺凯, 等, 2020. 贵州水城“7.23”高位远程滑坡冲击铲刮效应分析 [J]. 中国岩溶, 39 (4): 535-546.

高杨, 李滨, 冯振, 等, 2017. 全球气候变化与地质灾害响应分析 [J]. 地质力学学报, 23 (1): 65-77.

高杨, 贺凯, 李壮, 等, 2020. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析 [J]. 水文地质工程地质, 47 (4): 14-23.

高杨, 殷跃平, 李壮, 等, 2022. 高位远程岩质滑坡动力解体效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 41 (10): 1958-1970.

胡乐, 辛鹏, 王涛, 等, 2021. 硬土软岩滑坡近水平平移的离心机模型试验研究 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 73-82.

李壮, 高杨, 贺凯, 等, 2020. 贵州省六盘水水城高位远程滑坡流态化运动过程分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 520-532.

龙建辉, 任杰, 曾凡桂, 等, 2019. 双软弱夹层岩质滑坡的滑动模式及变形规律 [J]. 煤炭学报, 44 (10): 3031-3040.

孟桓羽, 占洁伟, 卢全中, 等, 2022. 陕西山阳“8.12”大型山体滑坡运动特征及数值模拟分析 [J/OL]. 工程地质学报: 1-18 [2022-06-09].

邢爱国, 高广运, 陈龙珠, 等, 2004. 大型高速滑坡启程流体动力学机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 23 (4): 607-613.

邢爱国, 殷跃平, 2009. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 37 (4): 481-485.

许强, 黄润秋, 殷跃平, 等, 2009. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩

滑灾害基本特征与成因机理初步研究 [J]. 工程地质学报, 17 (4): 433-444.

许强, 2010. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示 [J]. 工程地质学报, 18 (5): 596-608.

殷跃平, 2010. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 29 (2): 217-226.

殷跃平, 王文沛, 张楠, 等, 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究: 以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质, 44 (5): 827-841.

余飞, 陈善雄, 余和平, 2005. 顺层岩质边坡渐进破坏及失稳机理的数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 26 (S2): 36-40, doi: 10.16285/j.rsm.2005.s2.036.

张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC^{3D} 模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 31 (S1): 2601-2611.

张艳玲, 陈亮, 闫金凯, 等, 2021. 基于 DAN-W 模型的高速远程滑坡灾变过程分析 [J]. 西北地质, 54 (1): 204-211.

张远娇, 邢爱国, 朱继良, 2012. 汶川地震触发牛圈沟高速远程滑坡-碎屑流动力学特性分析 [J]. 上海交通大学学报, 46 (10): 1665-1670.

邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 31 (11): 2222-2231.