

新疆伊宁县喀拉亚尔奇滑坡动力学特征研究

杨龙伟^{1,2}, 魏云杰², 王文沛², 朱赛楠², 张楠²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 通过对高速远程黄土滑坡动力学特征的研究, 提出黄土高速远程滑坡空间预测的模拟方法。以新疆伊宁县喀拉亚尔奇黄土滑坡为例, 基于野外地质调查和无人机航拍影像图, 结合滑坡研究区的工程地质条件, 分析了该滑坡的基本特征和形成条件。研究发现, 该滑坡的主要诱发因素是冰雪融水入渗, 其孕灾模式主要为四个阶段: 后缘拉裂阶段, 黄土节理冻胀扩展阶段, 融雪入渗失稳阶段, 高速下滑阶段。同时利用 Rapid 模型对滑坡运动全过程进行模拟, 计算得到滑坡运动持续时间为 26 s, 最大运动速度达到 22 m/s, 堆积体的平均厚度达到 5 m 等运动特征要素, 结果表明 Rapid 模型可以较好的模拟分析黄土高速远程滑坡动力学效应, 为黄土地区类似滑坡的成灾机理和动力学效应分析提供参考。

关键词: 黄土滑坡; 成灾机理; 运动学; 数值模拟

中图分类号: P642

文献标识码: A

RESEARCH ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE KALAYAGAQI LANDSLIDE IN YINING COUNTRY, XINJIANG

YANG Longwei^{1,2}, WEI Yunjie², WANG Wenpei², ZHU Sainan², ZHANG Nan²

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shannxi, China;

2. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the study of dynamic characteristics of high speed long distance loess landslide, a simulation method for spatial prediction of high speed long distance loess landslide is proposed. Taking the Kalayagaqi loess landslide as an example, according to the field geological survey and aerial photograph images of the unmanned aerial vehicle, combined with the engineering geological conditions of the landslide research area, the basic features and formation conditions of the landslide are analysed. The study shows that the main inducing factor of the landslide is the infiltration of melted ice water, and there are mainly four disaster-inducing stages: Firstly, because of the concentration of stress at the top of the mountain, crack phenomenon appears in the trailing of landslide; Secondly, the mountain is covered with snow, and the loess joint fissure are enlarged by the effect of frost heave. Thirdly, due to the rising temperature and the infiltration of melted ice water, the sliding resistance of the landslide is gradually reduced. At last, the landslide lost its stability and slips at a high speed. The Rapid model was used to simulate the whole process of the kalayagaqi landslide. The results show that the duration of the landslide

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20179609); 中央高校基本科研业务费资助项目 (300102218118); 国家自然科学基金青年基金 (41602362)

作者简介: 杨龙伟 (1992-), 男, 在读博士, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究工作。E-mail: yang0504@chd.edu.cn

通讯作者: 魏云杰 (1973-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地质灾害与岩土工程等相关方面的研究。E-mail: wyj1973@126.com

收稿日期: 2018-05-28; **修回日期:** 2018-08-03

吴芳编辑

movement is 26 s, the maximum motion speed is up to 22 m/s and the average thickness of the accumulation body reaches 5 m. It proves that the Rapid model can be used to simulate and analyze the dynamic effect of high speed long distance loess landslide, providing reference for the analysis of the disaster-inducing mechanism and dynamic effect of similar landslides in the loess area.

Key words: loess landslide; disaster-inducing mechanism; kinematics; numerical simulation

0 引言

新疆伊犁州位于“一带一路”重要经济节点,其特有的浅层覆盖黄土斜坡受降雨和冰雪融水等作用极易发生流滑滑坡,具有运动速度快、致灾范围广、堆积体堵塞河流等特点,呈现出典型的高速远程滑坡链式灾害特征。由于高速远程滑坡带来的巨大灾害性,一直是国内外的研究热点。

关于高速远程滑坡,目前国内外暂无统一明确的定义,通常将滑坡的垂直落差与水平运动距离的比值小于 0.6、平均运动速度大于 5 m/s、致灾范围较广时的滑坡称为高速远程滑坡。高速远程滑坡的研究追溯于 18 世纪 Heim 对瑞士 Elm 滑坡—碎屑流的灾害现场的描述^[1]。真正引起世人关注这一现象的是 1963 年意大利的 Vaiont 滑坡,该滑坡体积达到 $2.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,摧毁了整个城镇并造成 2000 余人死亡^[2]。国内也发生了很多高速远程滑坡,较为典型的有 2008 年汶川大地震诱发的东河口滑坡,造成 260 人死亡。2017 年的茂县叠溪滑坡,滑动距离长达 3 公里,同时摧毁了整个新磨村,造成 83 人死亡。学者们对大量的高速远程滑坡进行成灾机理分析,认为高速远程滑坡的诱发因素主要为构造应力、地震、融雪和人类工程扰动影响等。同时根据滑坡运动的空间特征和时间特征,一般将滑坡运动全过程演化分成三个阶段:滑源启动、碎屑流运动和碎屑流堆积三个相互连续的阶段,且运动过程中普遍会伴随着铲刮、液化和运动流化等灾害效应。目前基于野外地质调查和遥感卫星影像图分析的滑坡成灾机制研究是识别和预防类似滑坡灾害的关键,也是抢险救灾的安全保障。但是对于预防潜在的高速远程滑坡而言,数值模拟更能够较为准确的分析滑坡动力学灾害效应,并进行风险评估。围绕高速远程滑坡的动力学数值模拟的方法主要有“质点法”^[3]、“动力学模型”^[4]“离散元方法”^[5]、“连续体方法”^[6]。其中,目前运用较多的是“离散元

方法”和“连续体方法”。离散元方法是基于牛顿第二定律对构成滑坡颗粒的受力、碰撞等进行分析,适合碎屑流型的滑坡^[7]。“连续体方法”主要是基于 N-S 方程,将滑体视为等效流体来进行分析,演化为 S-H 模型^[8]、DAN 模型等^[9-10],适合流动性滑坡的空间预测。Sassa^[11]基于流体连续性方程和运动方程,提出了将滑体视为“等效流体”的滑坡动力学模型软件 Rapid,可以较为准确计算出滑体运动特征。殷跃平^[12]利用 Rapid 对深圳光明新区渣土场滑坡的运动全过程进行了模拟,效果良好。沈伟、翟张辉等^[13-14]通过 Rapid 模型分别对黄土滑坡和黄土滑坡—泥石流的运动机制进行了分析。这些方法为研究新疆地区的黄土高速远程滑坡的动力学特征提供了很好的借鉴。

现以新疆伊宁县喀拉亚尕奇滑坡为例,通过野外地质调查和无人机航拍影像分析,研究喀拉亚尕奇滑坡的形成条件和孕灾机理。同时利用滑坡动力学模型 Rapid 计算喀拉亚尕奇滑坡的动力学特征要素,提出黄土滑坡空间预测模拟的基本思路,为西部地区类似的黄土滑坡的防灾减灾提供理论支撑。

1 喀拉亚尕奇滑坡概况

喀拉亚尕奇滑坡位于新疆伊宁县喀拉亚尕奇乡,滑坡中心点的坐标为东经 $81^{\circ}30'32''$,北纬 $44^{\circ}11'48''$,距离伊宁市区 53 km,距赛里木湖 43 km(见图 1)。滑坡后缘高程为 1281 m,滑坡剪切口高程为 1188 m,水平距离最远达到 380 m,其工程地质剖面图见图 2。滑坡在平面形态上呈现“长条形”,坡度接近 40° ,主滑方向为 $N69^{\circ}W$ 。受冰雪融水持续入渗影响,滑坡失稳高速下滑,并堵塞皮里青河,呈现了堵溃型黄土滑坡链式灾害特征。根据滑体的运动和堆积体特征,可将滑坡分为滑源区和堆积区:

滑源区(I区):滑体主要为第四系黄土。后缘上部分布有多条裂缝,裂缝宽度范围为 23 ~

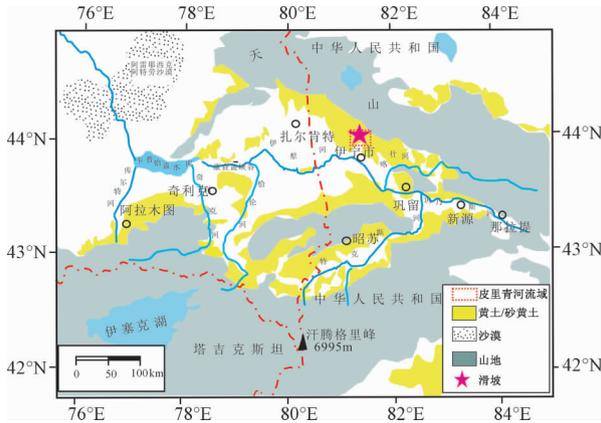


图1 喀拉亚尔奇滑坡地理位置图^[15]
Fig. 1 Location of the Kalayagaqi landslide

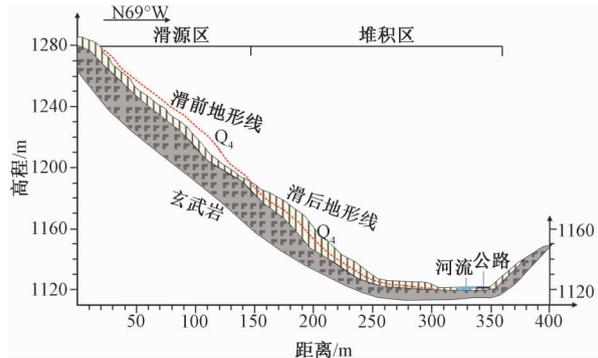


图2 滑坡工程地质剖面图
Fig. 2 Engineering geological section of the Kalayagaqi landslide

54 cm, 后缘上部还留有不稳定体, 其体积达到 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑源区平均宽度为 73 m, 在平面形态上呈现“倒舌”型, 面积约为 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体平均厚 4~7 m, 体积约为 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

堆积区 (II区): 堆积区在平面形态上呈现“扇形”, 沿着滑向方向长度最大达到 107 m, 垂直滑向长度最宽度达到 105 m。堆积区岩性以第四系黄土为主, 同时夹杂有中风化的粗砂岩, 这是由于滑坡在撞击对岸山体时, 铲刮坡体表面而形成。面积为 $1.46 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体厚度范围为 4~12 m, 体积大约有 $1.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

在皮里青河流域发生的滑坡地质灾害中 (见图 3), 主要以黄土高速远程滑坡为主, 这对当地农牧业生产造成巨大危害, 其中克孜勒赛滑坡掩埋了 402 头牛和 5 只羊, 造成的直接经济损失高达 49.06 余万元。类似的还有皮里青滑坡、阿西沟滑坡等^[16]。喀拉亚尔奇黄土滑坡是该地区近期发生的较为典型的高速远程黄土层内滑坡 (见图 4a),

该滑坡的诱发因素和动力学效应分析结果对黄土地区滑坡灾害的研究具有重要借鉴意义。



图3 皮里青河流域滑坡分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of landslide distribution in the Piliqing River Basin

2 喀拉亚尔奇滑坡形成条件

喀拉亚尔奇滑坡位于河流的凹岸, 长期受到河流的侧蚀作用, 使得滑坡前缘有较好的临空条件, 同时滑坡较陡, 坡度达 40° 。山体顶部附近出现相应的拉应力集中, 山体顶部裂缝受拉应力作用逐渐扩展 (见图 4b)。根据 2016 年 6 月 15 日 Google Earth 遥感影像图可以发现滑坡前缘已经出现了滑动, 滑动的体积大约为 9076 m^3 , 后缘出现了数条拉张裂缝, 同时形成了高达 1 m 的陡坎 (见图 4c)。这些都为黄土变形和应力释放提供了较好的地形条件。

滑体主要为第四系黄土, 结构比较疏松, 虫孔、大空隙构造和垂直节理比较发育, 属于低塑性粉土, 遇到水后极易膨胀和湿陷, 这些都为滑坡提供较好的物源条件。

滑坡所处的中高山地区, 从 10 月到次年 3 月为降雪期, 积雪厚度达 94 mm。坡体内部的裂隙水结冰, 因冻胀作用而使得垂直节理、裂缝扩大。从 3 月中旬开始, 气温回暖, 地表覆盖积雪开始融化, 沿裂缝和节理入渗, 在坡体表层范围内形成一定的暂态水压力和暂态饱和区, 使得坡体的抗滑力下降从而诱发滑坡发生。河流水位上涨同时也致使坡体内部的水力梯度下降, 冰雪融水也能长期储存于山体内部, 继续增大坡体下滑力, 加速

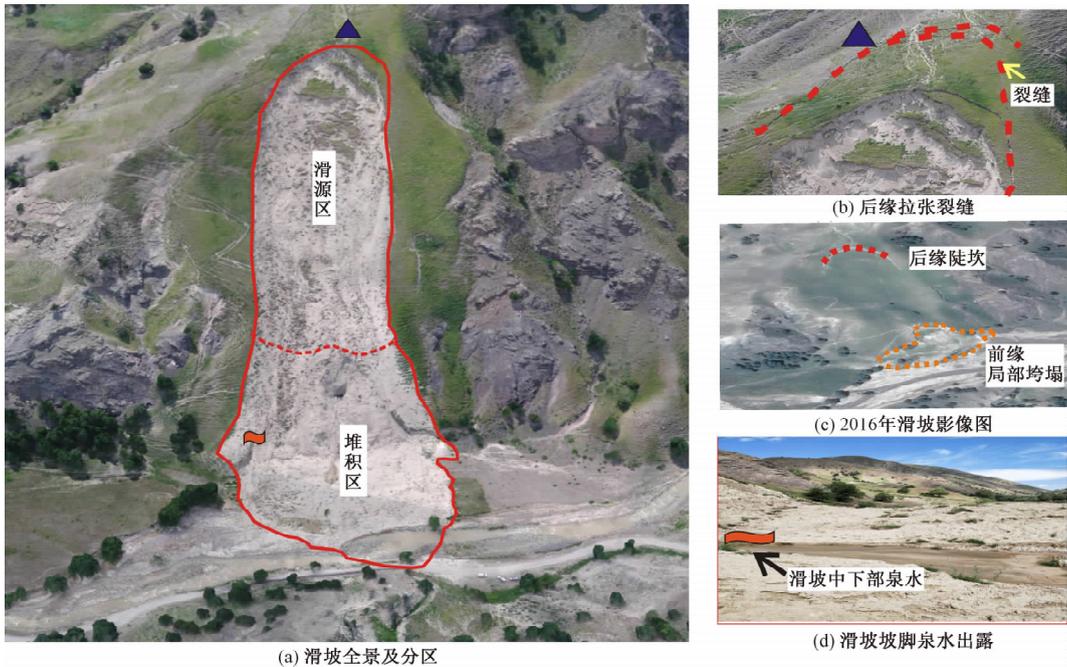


图4 滑坡全景及典型照片

Fig. 4 The panorama and typical photos of the Kalayagaqi landslide

形成潜在滑面。同时滑坡研究区出露的基岩主要为石炭系中的伊什基里克组凝灰岩、凝灰熔岩和灰绿色粗砂岩和石炭系下统大哈拉军山组的玄武岩，裂隙较为发育，储存有大量的冰雪融水，易于形成“管道”状通道，与表层第四系风成黄土接触区域，以泉眼的形式向外排泄（见图4d）。这些都为诱发滑坡提供了较好的水文条件，为黄土滑坡易于转化为高速远程滑动进一步的提供了良好的地下水液化层条件。

综上所述，在良好的地形、物源和水文地质条件因素的共同作用下，喀拉亚尔奇滑坡的运动全演化主要分为四个过程。第一阶段（后缘拉裂阶段）：单薄山体两面临空致使滑坡后缘拉应力集中，使得滑坡后缘裂缝逐渐扩大。第二阶段（冻胀扩缝阶段）：从10月至次年3月，滑坡研究区处于雪季，地表覆盖积雪，黄土垂直节理受冻胀，节理裂隙扩大，形成优势入渗通道，裂隙水成冰形成冻结滞水。第三阶段（融雪入渗失稳阶段）：3月开始，气温回暖，坡面积雪开始融化，沿着裂隙大量入渗，在坡面处形成暂态水压力和暂态饱和区。同时，各节理裂隙末端联通，形成潜在滑面。第四阶段（高速下滑阶段）：由于受上游融雪补给，河流流速增大，加速了对坡脚的冲刷作用。滑体在融雪持续入渗的影响下，滑体的抗剪强度

逐渐减小，最后，滑坡失去稳定高速下滑，并堵塞了皮里青河。

3 喀拉亚尔奇滑坡数值模拟

3.1 基本原理

Rapid模型是基于流体连续性方程和运动方程，将滑体视为“等效流体”的滑坡动力学模型^[11]，该模型主要是在欧拉坐标系下将滑体进行网格划分，然后将已经固定的网格点高程设置为未知参数，通过时间有限元差分方法，进而求得高程与时间的变化关系。通过Rapid模型可以获得滑坡运动过程中的路径、速度、堆积体厚度变化等动力学参数，这为类似于喀拉亚尔奇滑坡等新疆地区的黄土层内滑坡的动力学效应提供了研究方法。

Sassa^[11]基于Rapid模型阐述了高速远程滑坡运动机理—液化学说。他认为滑体在高速下滑的过程中，挤压滑面上的岩土颗粒，造成孔隙水压力急剧上升，饱和滑带土在滑体的剪切作用下产生了液化现象（见图5），这使得滑面土体的抗剪强度降低，进而诱发了“高速远程滑坡”的发生。Sassa^[11]引入了视摩擦系数的概念 ϕ' ，其主要受孔隙水压力和滑动时的内摩擦角的影响，Okada^[17]提出了稳定稳态剪切强度概念 τ_{ss} ，即在饱和情况下滑

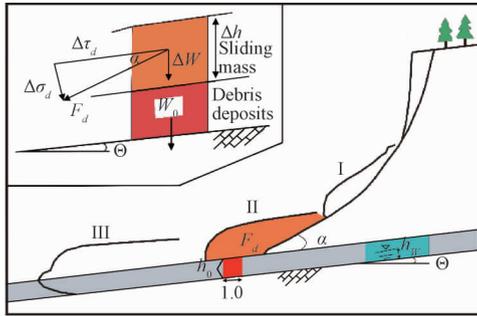
体的剪切强度达到的一个稳定值。Wang^[18]通过环剪试验和不排水三轴试验, 提出了孔隙水压力系数 B_{ss} , 有效的解决了非饱和情况下在不同含水率条件下滑体的稳态剪切强度的变化趋势, 上述参数的关系如下公式 (1) — (3)。

$$\tau(h, B_{ss}) = \tau_{ss} + (\sigma(h) \tan\phi' - \tau_{ss})(1 - B_{ss}) \quad (1)$$

$$\sigma(h) = \gamma h \cos^2\theta \quad (2)$$

$$\tan\phi_a = \frac{\tau_{ss}(h, B_{ss})}{\sigma(h)} \quad (3)$$

公式中: γ 为滑体容重; ϕ_a 为视摩擦角; h 为堆积体厚度; $\sigma(h)$ 为滑体受到的正应力。



F_d - 下滑力; h_w/h_0 - 初始地下水水位/加载后地下水水位;

Δh - 加载滑体厚度; W - 滑体重量; $\Delta\tau_d$ - 滑体所受切应力;

$\Delta\sigma_d$ - 滑体所受正应力; α - 坡角

图 5 滑体运动加载作用示意图^[11]

Fig. 5 The schematic diagram of motion loading of the landslide^[11]

3.2 模型建立及参数选取

根据对滑坡的成灾机理进行分析, 良好的水文地质条件促使了滑坡发生了运动液化现象, 由此可见 Rapid 模型是适用于该滑坡的。提取喀拉亚尔奇滑坡地形数据资料, 形成 121×137 个差分节点, 进一步将模型分为 120×136 个网格, 网格大小尺寸为 $5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。同时为了避免计算出现不收敛的现象, 弱化边界效应, 将皮里青河网格进行人工勾画, 这样可能忽略了滑坡造成的堵溃效应, 但是对滑坡在进入河水之前的动力学效应不会产生影响。

由于喀拉亚尔奇滑坡主要为黄土层内滑坡, Rapid 模型计算所需参数主要为滑体重量、有效抗剪强度、稳态强度、孔隙水压力累计系数。这些参数的选取主要是根据室内土工试验和已有的研究成果来获得^[13-14]。经试验测定, 黄土容重为 $18\gamma/\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$, 有效粘聚力为 32 kPa , 有效摩擦角为 12° , 远小于坡度, 使得滑坡启动后速度很

大。对于孔隙水压力累计系数的取值, 根据 Wang 提供的 B_{ss} 经验参数^[17], 结合野外地质调查情况发现, 滑源区受冰雪融水入渗影响, 滑体已接近饱和状态, 故滑源区的孔隙水压力累计系数 B_{ss} 取 0.95 。堆积区滑体沿沟口方向堆积, 且运动速度逐渐减缓, 排水条件良好, 根据经验估值其 B_{ss} 取 0.81 。稳态剪切强度受滑体的粒径组分影响较大, 滑源区滑体主要为第四系黄土, 垂直节理裂隙较为发育, 土体孔隙较大, 为低塑性粉土, 在滑动过程中受剪切作用易达到稳定状态, 取稳态剪切强度 τ_{ss} 为 6 kPa 。堆积区由于受到对岸山体的阻挡作用, 稳态剪切强度取值取较大值, 则稳态剪切强度为 45 kPa 。结合已有的黄土滑坡的参数取值, 处于主动土压力状态的滑源区 (黄土) 的侧压力系数 k 取 0.48 , 处于被动土压力的堆积区 (砂砾石) 的侧压力系数 k 取 0.54 。综上所述, Rapid 模型所需的参数见表 1。

表 1 喀拉亚尔奇滑坡 Rapid 模型参数

Table 1 Parameters of Rapid model of the Kalayagaqi landslide

区域	容重 ($\gamma/\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$)	有效 摩擦角 ϕ	孔压 系数 B_{ss}	剪切抗力 (τ_{ss}/kPa)	侧向 土压力 系数 k
滑源区	18	12	0.95	6	0.48
堆积区	18	12	0.81	45	0.54

3.3 计算结果分析

3.3.1 滑体速度

利用 Rapid 模型软件计算可知, 喀拉亚尔奇滑坡运动总时长为 26 s 。滑体运动速度的变化趋势主要呈现三个阶段: $0 \sim 10 \text{ s}$ 为滑坡加速阶段, 速度呈线性增加, 平均加速度为 2.3 m/s^2 。 $10 \sim 20 \text{ s}$ 为速度稳定阶段, 由于受到阶地砂砾石的摩擦作用, 速度略有减小, 平均速度达到 22.5 m/s 。 $20 \sim 26 \text{ s}$ 为滑体减速阶段, 由于受到对岸山体的阻挡作用, 速度急剧减小, 减速阶段的平均加速度达到 -3.6 m/s^2 。其中在 22 s 以后, 由于滑源区部分块体零星散落, 则滑坡速度很小, 接近于 0 m/s 。由于坡度较陡及黄土内部结构遭到破坏, 其结构性强度急剧下降, 致使滑坡启动后速度呈线性增加。同时由于堆积区有泉水出露及阶地 (砂砾石) 具有较低的运动液化阈值, 使得滑坡能够运动较远的距离 (见图 6)。

3.3.2 滑坡体运动形态和堆积体厚度

根据滑坡运动速度的变化趋势, 选取 10 s 、

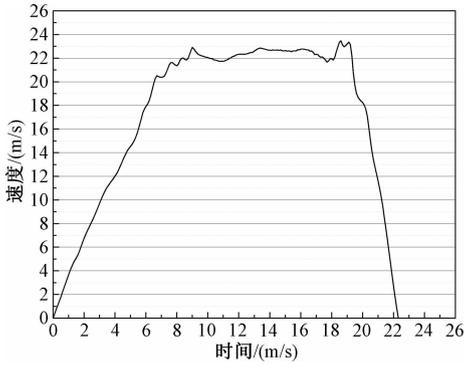


图6 滑体平均速度随时间变化图

Fig. 6 Variation figure of average velocity of the landslide with time

15 s、20 s、22 s 这四个时间点的滑坡体的堆积形态来分析 (见图 7), 这 4 个点分别代表滑坡加速结束点, 滑坡稳定速度点, 滑体运动至对岸坡脚点和滑坡运动后期点。在滑坡加速点 $t = 10$ s, 滑坡前缘已经运动至坡脚 (见图 7), 由于滑坡坡度较陡, 滑体势能转化成动能的缘故, 滑体速度高达 22.9 m/s (见图 8)。接着滑坡前缘进入河漫滩, 受砂砾石摩擦阻碍作用致使势能急剧减小, 滑体的平均速度略有下降, 但是依然保持一个高速运动的过程。在 $t = 20$ s 时, 滑坡前缘运动接近至公路处, 受地形变化影响, 滑体速度出现波动, 接着滑体越过公路, 在 $t = 20$ s 运动至对岸山体坡脚处, 速度急剧减小, 直至运动停止。

从剖面的形式, 以每隔 5 s 的时间来分析滑坡堆积体的形态变化和厚度变化情况 (见图 9、图 10)。在 5 s 时, 滑体的平均厚度 3 m, 其中在 $X = 148$ m

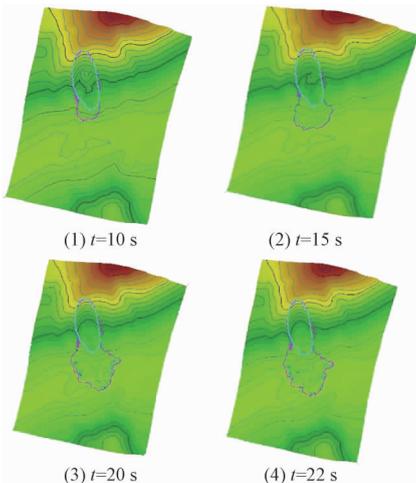


图7 不同时刻滑坡堆积形态变化图

Fig. 7 Variation diagram of landslide accumulation form at different time

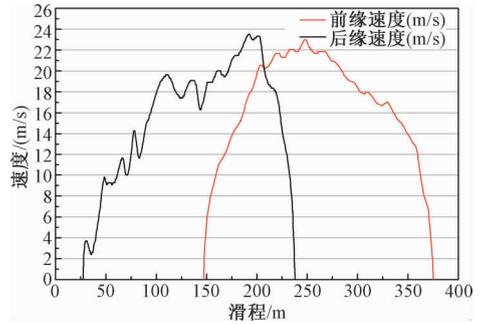


图8 滑体前后缘运动速度图

Fig. 8 Velocity chart of the front and the rear edge of the landslide

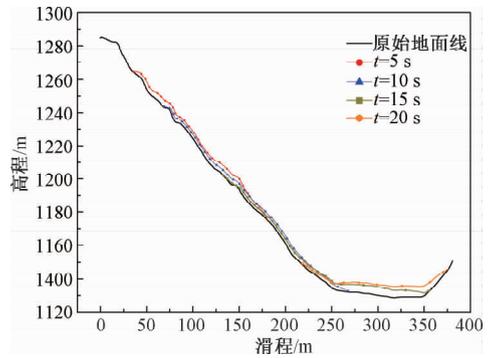


图9 堆积体剖面形态变化图

Fig. 9 Variation diagram of the accumulation body profile

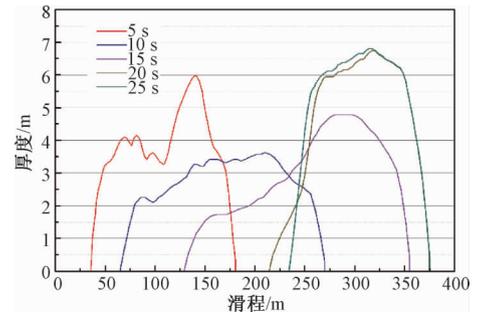


图10 堆积体厚度变化图

Fig. 10 Variation diagram of the accumulation body thickness

处, 滑体厚底达到 6 m。在 25 s 时, 滑体的平均厚度已经达到 5 m, 其中在 325 m 处堆积体厚度达到 6.8 m。同时滑坡后缘运动至水平距离 230 m 处, 说明滑源区残留有部分滑体, 但是厚度只有 2 ~ 3 m, 滑坡前缘运动至 380 m 处停止。

计算结果表明, 对于黄土浅层滑坡, Rapid 模型可以较为准确计算滑坡的运动速度、致灾范围等滑坡运动灾害效应, 同样也可以将其运用到潜在滑坡的动力学灾害效应分析中, 其主要思路如下: 首先, 通过野外地质调查和无人机航拍影像、遥感卫星影像, 获取潜在滑坡的地形线 (DEM),

利用物探和钻机等手段确定潜在滑面的位置。其次,通过室内土工试验和已有成果的经验值,确定 Rapid 模型参数。然后,将 DEM 和参数导入 Rapid 模型进行多次计算。最后对滑体速度、堆积体厚度、致灾范围等计算结果进行提取,分析滑坡的动力学灾害效应,对滑坡灾害进行空间预测。

4 结论

根据野外地质调查和无人机航拍影像,结合滑坡研究区的工程地质条件,分析了喀拉亚尔奇滑坡的诱发因素和形成机制。同时利用 Rapid 模型模拟了滑坡运动全过程,计算了滑坡运动特征要素,主要结论如下:

(1) 喀拉亚尔奇滑坡为黄土层内滑坡,其孕灾过程主要分为四个阶段:后缘拉裂阶段,冻胀扩缝阶段,融雪入渗失稳阶段,高速下滑阶段。

(2) 滑坡的主要诱发因素为冰雪融水入渗,节理裂隙末端联通,形成潜在滑面。同时良好的水文地质条件、物源条件、地形条件致使皮里青河流域易发生黄土高速远程滑坡。

(3) Rapid 动力学模型可以较好的模拟黄土高速远程滑坡的动力学特征,计算发现滑坡运动全过程主要分为加速阶段、稳定阶段、减速阶段,较为准确的计算出滑坡的平均速度、堆积体厚度变化情况,为研究类似滑坡的动力学效应和空间预测提供借鉴。

参考文献/References

- [1] Heim A. Bergsturz und menschenleben [M]. Zurich: Fretz & Wasmuth Verlag, 1932: 218.
- [2] Genevois R, Ghirotti M. The 1963 vaiont landslide [J]. *Giornale di Geologia Applicata*, 2005, 1 (1): 41 ~ 52.
- [3] Bartelt P, Salm B, Gruber U. Calculating dense-snow avalanche runout using a voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining [J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45 (150): 242 ~ 254.
- [4] Savage S B, Hutter K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: analysis [J]. *Acta Mechanica*, 1991, 86 (1~4): 201 ~ 223.
- [5] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 1979, 29 (1): 47 ~ 65.
- [6] Voight B, Sousa J. Lessons from Ontake-san: A comparative analysis of debris avalanche dynamics [J]. *Engineering Geology*, 1994, 38 (3~4): 261 ~ 297.
- [7] Melin S. Simulation of sound propagation in granular media on the connection machine [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 1993, 4 (6): 1103 ~ 1107. (请核对年份)
- [8] Pudasaini S P, Hsiau S S, Wang Y Q, et al. Velocity measurements in dry granular avalanches using particle image velocimetry technique and comparison with theoretical predictions [J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17 (9): 093301.
- [9] Gao Y, Yin Y P, 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.
- [10] Xing A G, Yuan X Y, Xu Q, et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2016, 14 (1): 83 ~ 98.
- [11] Sassa K, Nagai O, Solidum R, et al. 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*, 2010, 7 (3): 219 ~ 236.
- [12] Yin Y P, Li B, Wang W P, et al. Mechanism of the December 2015 Catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. *Engineering*, 2016, 2 (2): 230 ~ 249.
- [13] 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.
- SHEN Wei, ZHAI Zhanghui, LI Tonglu, et al. Simulation of propagation process for the Dabaozi Rapid long run-out loess landslide in the south bank of the Jinghe river, Shaanxi province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24 (6): 1309 ~ 1317. (in Chinese with English abstract)
- [14] 翟张辉, 沈伟, 李同录, 等. 天水市大沟滑坡-泥石流运动过程模拟分析 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25 (S1): 400 ~ 406.
- ZHAI Zhanghui, SHEN Wei, LI Tonglu, et al. Analysis and simulation of the landslide-debris flow hazard in Dagou village, Tianshui city [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25 (S1): 400 ~ 406. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘丽楠, 李守定, 姜越, 等. 新疆伊犁加朗普特黄土滑坡泥石流降雨诱发机理 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25 (5): 1230 ~ 1237.
- LIU Li 'nan, LI Shouding, JIANG Yue, et al. Failure mechanism of loess landslides due to saturatedunsaturated seepage --case study of Gallente landslide in ILI, Xinjiang [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25 (5): 1230 ~ 1237. (in Chinese with English abstract)
- [16] 庄茂国, 魏云杰, 邵海, 等. 新疆伊犁皮里青河黄土滑坡类型及其发育特征 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29 (1): 54 ~ 59.
- ZHUANG Maoguo, WEI Yunjie, SHAO Hai, et al. Type and characteristics of loess landslides in Piliqing river, in Yili of Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29 (1): 54 ~ 59. (in Chinese with English abstract)
- [17] Okada Y, Sassa K, Fukuoka H. Liquefaction and the steady state of weathered granitic sands obtained by undrained ring shear tests: a fundamental study of the mechanism of liquidized landslides [J]. *Journal of Natural Disaster Science*, 2000, 22 (2): 75 ~ 85.
- [18] Wang F W, Sassa K. Landslide simulation by a geotechnical model combined with a model for apparent friction change [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, 35 (3~5): 149 ~ 161.