

文章编号: 1008-2786-(2017)4-000-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000250

芦山地震汤家沟滑坡-碎屑流过程模拟

夏式伟, 郑昭炀, 袁小一, 邢爱国*

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 2013 年 4 月 20 日四川省芦山县发生 $M_s 7.0$ 级强烈地震, 诱发芦山县、天全县、宝兴县等多个县区 2500 多处崩塌、落石、滑坡、泥石流等次生灾害, 但规模较小。天全县老杨乡汤家沟滑坡-碎屑流是此次地震诱发的最大一处滑坡, 在地震作用下约有 53 万 m^3 的岩体自滑源区高速滑出。因剪出口下方山脊的阻挡作用滑体沿左右两侧发生分叉, 此后分别沿春尖窝沟和干沟头沟高速运动, 滑行约 340 m 和 440 m 后与各自沟谷侧壁发生撞击、爬坡解体为碎屑流, 碰撞转向后继续向下滑行, 总滑行距离约 1.6 km, 高程差约 480 m。尽管关于芦山地震滑坡的研究很多, 但对滑坡全过程动态模拟的研究较少。本文通过滑坡现场调查, 解析了汤家沟滑坡的基本运动特征和滑体运动过程中发生的碰撞、铲刮、堆积等现象, 并基于 DAN3D 动力分析软件, 采用 Friction-Voellmy 复合模型反演了汤家沟滑坡运动全过程, 得到了滑体的堆积、速度分布以及铲刮等特征。

关键词: 芦山地震; 滑坡-碎屑流; 数值模拟; 动力特性; DAN3D

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

2013 年 4 月 20 日 8 时 02 分, 四川省芦山县 (30.3°N , 103.0°E) 发生 $M_s 7.0$ 级强烈地震, 诱发芦山县、天全县、宝兴县等多个县区 2500 多处崩塌、落石、滑坡、泥石流等次生灾害^[1], 在天全县老杨乡大庙村汤家沟 (30.17°N , 102.77°E) 发生唯一一处大规模滑坡。许冲等^[2]对芦山地震诱发的滑坡机理进行了分析和研究, 认为天全县复杂的地势构造和地形地貌是造成此次滑坡的主要原因。芦山地震发生的区域曾是汶川地震的重灾区, 大部分区域经历了峰值加速度大于 0.19 m/s^2 的强烈地震动, 减弱了自然斜坡的强度, 促进了芦山滑坡的形成。此外, 芦山地区的强降雨量和高植被覆盖率也对滑坡的发生产生一定影响。崔鹏等^[3]认为天全县的滑坡主要受构造、岩性结构面和地形控制, 脆弱的地质环境、陡峻的地势, 丰沛的降雨为滑坡的形成提供了有利条件。张丹丹等^[4]从高程效应的角度分析, 认为

海拔较高区域, 地质灾害分布相对明显, 受地震及自然条件影响, 地震发生时, 岩体自身应力集中释放, 高海拔的崩塌岩体将固有的重力势能转化为动能, 促使崩滑体的产生。殷志强等^[1]提出震动-拉裂-崩滑-碰撞-铲刮-碎屑流灾害链, 认为汤家沟滑坡是由单薄山脊拉裂, 岩土体失稳破坏导致的。胡卸文等^[5]认为汤家沟滑坡发生的原因是滑源区山脊单薄陡峭, 岩体风化严重, 存在利于发生滑坡的有利结构面, 而芦山地震的震动效应是触发此次滑坡的直接原因。上述研究主要从崩滑形成条件、产生原因、发生机理等几个方面进行论述, 并未对汤家沟滑坡的动态过程进行深入分析和模拟。本文基于相关文献和现场地质调查, 采用 DAN3D 动力分析软件反演了汤家沟崩滑-碎屑流运动全过程, 解析了滑坡的基本运动特征和碎屑流堆积特性, 为今后类似地形条件和地质情况的岩质崩滑的空间预测提供技术参考。

收稿日期(Received date): 2016-07-18; 改回日期(Accepted date): 2016-10-17

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41530639)。[National Natural Science Foundation of China Key Program(N41530639)]

作者简介(Biography): 夏式伟(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事高速远程滑坡研究。[Xia Shiwei(1990-), male, M. Sc candidate, principally engaged in high-speed and long-runout landslide research.] E-mail: 903092557@qq.com.

* 通讯作者(Corresponding author): 邢爱国(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地质灾害防灾减灾方面的研究工作。[Xing Ai-guo(1971-), male, professor, specialized in geological hazard prevention and mitigation.] E-mail: xingaiquo@sjtu.edu.cn.

1 汤家沟崩滑-碎屑流

1.1 地质环境条件

1.1.1 地质构造和岩性

天全县位于四川盆地西部边缘,地处二郎山东麓,属邛崃山系夹金山脉山地,地质构造复杂。崩滑区位于双石-大川断裂带附近^[6],距震中直线距离约 25 公里。崩滑区出露地层为三叠系下统嘉陵江组白云质灰岩,山脊部位岩体呈强风化,完整性较差,多为层状碎裂结构^[7]。

1.1.2 地形地貌

天全县地貌呈深中切割,地势西北高,东南低,西北部多为中山高地,区内山高谷深,地质构造和地层岩性复杂、褶皱,呈断层发育^[8]。滑源区地处天全县东部,地形复杂,滑坡沟槽两侧坡度较陡,春尖窝沟和干沟头沟沟顶沟底相对高差分别达 460 m 和 400 m,两侧地形平均坡度分别达 50°和 56°,山脊局部最大坡度高达 63°,地形总体陡峭^[5]。

1.2 滑坡体特征

1.2.1 滑坡分区

根据汤家沟滑坡的运动特征和现场实地调查结果,将崩滑体分为滑源区、铲刮区 I、II 和碎屑流堆积区 III,如图 1 所示。

(1) 滑源区

滑源区后缘高程为 1630 m,前缘剪出口高程为 1480 m,高差 150 m,滑源区总长约 236 m,平均厚度约 15 m,平均宽度约为 150 m,估算初始启动方量约为 53 万 m³,山体平均坡度约为 55°。

滑源区启动物质主要为嘉陵江组白云质灰岩和第四系破残积松散层^[6],滑坡所在山脊地势陡峭,地形复杂。

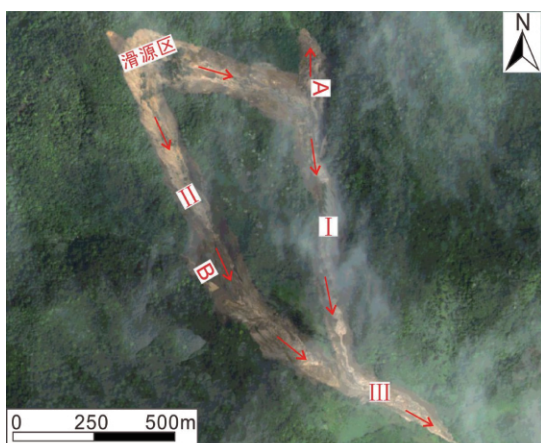
(2) 铲刮区 I、II

根据现场滑体的铲刮堆积情况,将铲刮区分为 I、II 两个区。I 区春尖窝区,高程为 1210 ~ 1480 m,滑体主要堆积于高程 1210 ~ 1270 m 区段,沟槽平均宽约为 45 m,堆积厚度在 14 ~ 20 m 之间。II 区干沟头区,高程为 1200 ~ 1490 m,滑体堆积主要位于高程 1200 ~ 1360 m 区段,沟槽平均宽约为 45 m,平均堆积厚度约为 18 m。

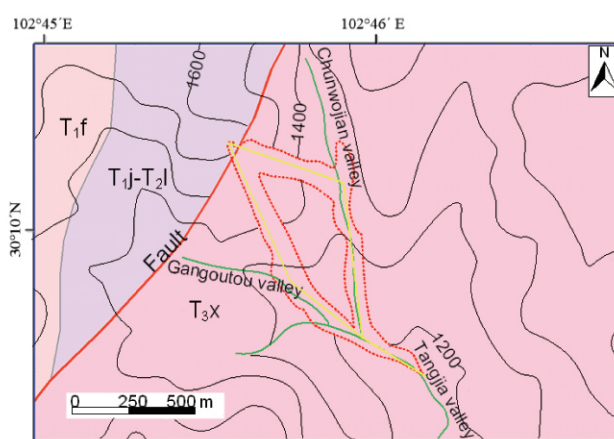
崩滑体由滑源区启动后,沿着 130°方向快速运动,在 1480 m 处受到剪出口下方山脊的阻挡作用,分叉成两个方向,左侧春尖窝沟和右侧干沟头沟(图 2b)。左侧滑体沿春尖窝沟高速向下滑行约 340 m 后与沟槽侧壁发生撞击(图 2c),形成约 35 m 的爬高(图 1a 位置 A 和图 2d)。绝大部分的滑体在撞击山体后向右转向约 60°后继续沿沟槽向下运动,最终在高程 1200 m 处与右侧滑体交汇(图 2e)。右侧滑体由剪出口滑出后向下快速滑行约 440 m 后,与 B(图 1a)点处山体发生撞击,形成约 15 m 的超高(图 2b)。大部分滑体在撞击山体后向左偏转约 35°继续顺沟槽向下运动,最终在高程 1160 m 处停滞(图 2f)。

(3) 碎屑流堆积区 III

该区为碎屑流堆积区,后缘高程为 1210 m,前缘高程为 1160 m,高差 50 m。流通区通长约为 422 m,堆积体平均厚度约为 18 m,平均宽度约为 54 m。堆积物主要为中小粒径碎石土。



(a) 汤家沟滑坡航拍图



(b) 汤家沟地质图

图 1 汤家沟滑坡-碎屑流航拍图和地质图

Fig. 1 Post-event aerial photograph and Geological map of Tangjia valley rock avalanche

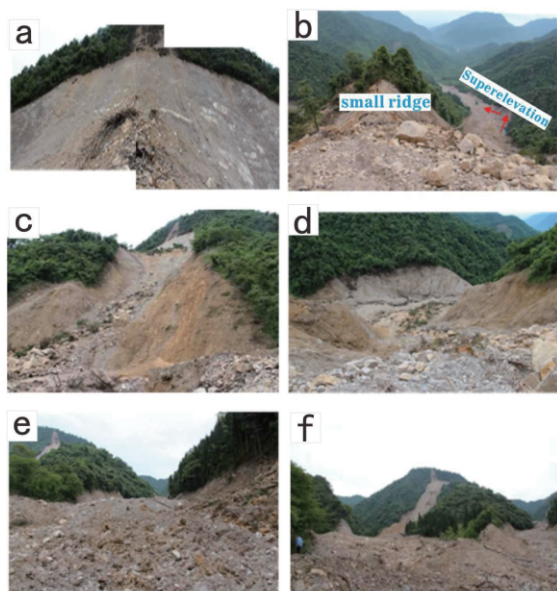


图2 汤家沟滑坡现场图片。(a)崩塌发生后滑源区地貌;(b)干沟头沟B处滑体撞击后超高;(c)崩滑后春尖窝沟仰视图;(d)滑体与春尖窝沟沟槽侧壁撞击爬坡;(e)春尖窝沟槽内松散堆积物;(f)左、右两侧滑坡碎屑物最终在汤家沟下游交汇。

Fig. 2 Characteristics of the Tangjia valley rock avalanche. a. Head scarp of the rock avalanche; b. Superelevation in the valley bend at location B in Fig. 1a; c. View of the upper part of the Chunjianwo valley towards the source area; d. Displaced materials ran up the opposite slope on the left bank of the Chunjianwo valley at location A in Fig. 1a (downstream view); e. Deposits in the Chunjianwo valley; f. Two parts of debris flow converged into the Tangjia valley.

1.2.2 滑坡形成特征

汤家沟滑坡所在位置地势陡峭,地质构造复杂,受单薄山脊控制,滑坡发生地距芦山地震震中直线距离约为25 km,传至滑坡点的地震波走向与单薄山脊地势走向近乎垂直,山脊恰巧处于最不利的受力位置。强烈的地震力迫使山脊撕裂破坏,发生岩

体崩塌,巨大的重力势能瞬间转化为动能形成高速滑坡体。滑源区(图1a,图2a)后缘高程1630 m,前缘剪出口高程1480 m,前后高差达150 m。滑源区的崩滑体高速滑出后,分别沿东西两侧沟槽高速运动(图2b),沿途不断铲刮沟槽表层物质,分别运动了约340 m和440 m后与春尖窝沟和干沟头沟沟槽侧壁发生撞击形成爬高(图2d,图2b),变向后沿各自沟槽向下滑行约520 m和412 m后交汇(如图2e),此后继续滑行约422 m停止。

2 汤家沟滑坡-碎屑流动力特性模拟与分析

2.1 DAN-3D 简介

DAN3D是一款基于windows操作平台的动力特性分析软件,主要用于模拟滑坡碎屑流、崩塌等自然灾害的动力特性,其基本原理是将滑体等效为连续介质流体,通过选择不同的流变模型,设定滑体流域,调试滑体的材料参数,模拟出滑体不同时刻的运动特征、铲刮特征、堆积特征等性质。张远娇^[9]、王国章^[10]等应用DAN3D软件分别对汶川地震牛圈沟滑坡和重庆武隆鸡冠岭滑坡进行了模拟,都得到了较好的结果,丰富了该软件的应用和研究。本文运用DAN3D软件对汤家沟大型滑坡-碎屑流进行了全过程模拟,解析了滑坡的运动、铲刮、堆积等特征。

2.2 DAN3D 模型

按1:10 000的比例尺生成的DEM(Digital Elevation Model)如图3所示。对汤家沟滑前滑后地形进行对比分析,估算此次崩滑的总方量约为100万 m^3 。

动力学模型是由内部的流变关系控制的,大量的模拟结果表明,Friction模型和Voellmy模型是最

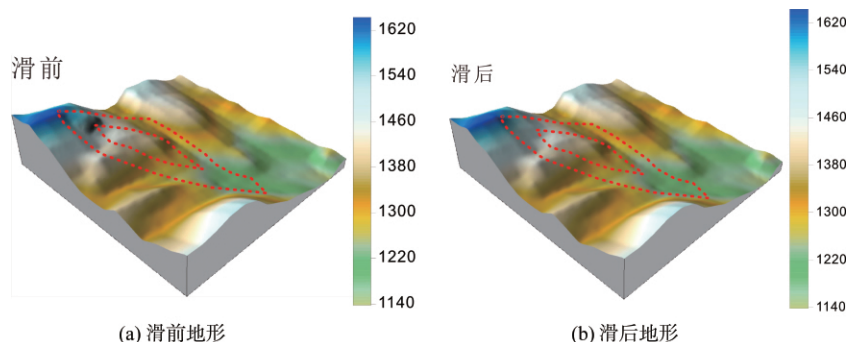


图3 汤家沟崩滑-碎屑流三维数字高程模型

Fig. 3 DEM of Tangjia valley rock avalanche

能表现滑坡运动特征的^[11-13]。摩擦准则假定抗剪应力的的大小受有效正应力控制,其表达式为:

$$\tau = \sigma(1 - r_u) \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为滑体底部的剪应力(Pa); σ 为垂直于滑动路径方向的总应力(Pa); r_u 为滑体的孔隙水压力比; φ 为动摩擦角($^{\circ}$)。

式(1)中,滑体的孔隙水压力比 r_u 和动摩擦角 φ 与综合摩擦角 φ_b 存在如下关系:

$$\varphi_b = \arctan(1 - r_u) \tan \varphi \quad (2)$$

Voellmy 准则中假定滑体受到的抗剪应力为滑体所受摩擦力和湍流流动产生的额外阻力之和,其表达式为:

$$\tau = \sigma f + \rho g v^2 / \xi \quad (3)$$

式中: f 为摩擦系数; ξ 为湍流系数; g 为重力加速度(m/s^2); v 为滑体的平均速度(m/s); ρ 为滑体的密度(kg/m^3)。

为了确定模拟结果与实际情况的符合程度,可将模拟得到的滑体速度与 Evans^[14] 提出的经验公式计算得出的速度进行比较,以此判断反演结果的可靠性。具体表达式如下:

滑体碰撞爬高时,其速度经验公式为^[14]:

$$V_{\min} = (2gh)^{0.5} \quad (4)$$

式中: V_{\min} 为计算位置的最小速度(m/s); g 为重力加速度(m/s^2); h 为滑体爬高(m)。

滑体弯道超高时,其速度经验公式为^[14]:

$$V_{\min} = (gdr/b)^{0.5} \quad (5)$$

式中: d 为弯道超高高度(m); r 为弯道半径(m); b 为弯道宽度(m)。

摩擦准则中,滑体的流动性主要受孔隙水压力比 r_u 和综合摩擦角 φ_b 控制, r_u 越大 ξ_b 越小,滑体的流动性就越好。Voellmy 准则中,滑体的流动性主要受摩擦系数 f 和湍流系数 ξ 影响, ξ 越大 f 越小,滑体的流动性就越好,速度也越大,滑体最终运动的距离也更远。为了实现滑坡实例的最佳模拟,根据汤家沟滑坡的地质岩性、滑坡运动特性、滑移路径,结合现场调查情况以及两个准则的特点,汤家沟滑坡采用 Friction-Voellmy 复合模型进行模拟,经过试错法多次反复调试,得到一组比较理想的参数组合,如表 1 所示。考虑到滑体孔隙水压力的变化,在滑源区滑体的容重设定为 20 kN/m^3 ,内摩擦角为 35° ,铲刮区的容重设为 18 kN/m^3 ,内摩擦角为 32° 。

表 1 模型计算参数

Tab. 1 Rheological parameters and models for Tangjia valley rock avalanche

模型	F	V	V
容重(kN/m^3)	20	18	18
摩擦角($^{\circ}$)	30	—	—
内摩擦角($^{\circ}$)	35	32	32
孔隙压力系数	0.4	—	—
摩擦系数	—	0.12	0.12
紊流系数	—	500	600

F —摩擦流动模型

V —Voellmy 流动模型

2.3 滑坡-碎屑流过程模拟

DAN3D 模拟得到的汤家沟滑坡-碎屑流运动过程如图 4 所示。

0 ~ 20 s 阶段,崩塌体自滑源区启动沿滑动破坏面快速向下运动,在高度 1480 m 处受到小山脊的阻挡分叉为两股滑体($t = 10 \text{ s}$),一股朝春尖窝沟方向运动,20 s 末与沟槽侧壁发生撞击,滑行距离约为 340 m。另一股朝干沟头沟方向运动。从图中可以发现滑体自滑源区启动后以整体向下滑移的方式运动,左侧滑体与沟槽侧壁发生撞击的时间要早于右侧,这与滑坡发生区域的地形特征、运距,以及现场考察后预测的滑体运动情况相吻合。从滑体运动的时间和特征来看,该时间段内滑体处于高速运动状态,积聚的能量较大,因而对沿途山体的铲刮和破坏比较严重。

20 ~ 40 s 阶段,左侧滑体与春尖窝沟沟槽侧壁发生撞击解体为碎屑流($t = 20 \text{ s}$),并形成爬高。解体的碎屑流部分向上游运动,其余大部分发生 60° 转向后沿沟槽继续向下运动。右侧滑体则与干沟头沟沟槽侧壁发生碰撞($t = 30 \text{ s}$),形成超高。碰撞后的大部分滑体发生 35° 转向后继续沿沟槽向下运动。此阶段主要发生滑体与沟槽侧壁的撞击,同时在高度 1450 ~ 1480 m 段开始出现滑体的堆积。

40 ~ 60 s 阶段,经撞击变向后的碎屑流沿春尖窝和干沟头沟分别向下运动约 520 m 和 412 m 后发生交汇($t = 60 \text{ s}$),干沟头沟侧的滑体要先于春尖窝沟到达交汇点,并在高度 1450 ~ 1480 m 段出现堆积。

60 ~ 80 s 阶段,进入该阶段,从图中可以明显看出滑体的运动速度已经放缓,20 s 内滑体运动距离约为 150 m,小于之前的 400 m/20 s。由于干沟头侧滑体要先于春尖窝到达交汇点,在 $t = 80 \text{ s}$ 时可以

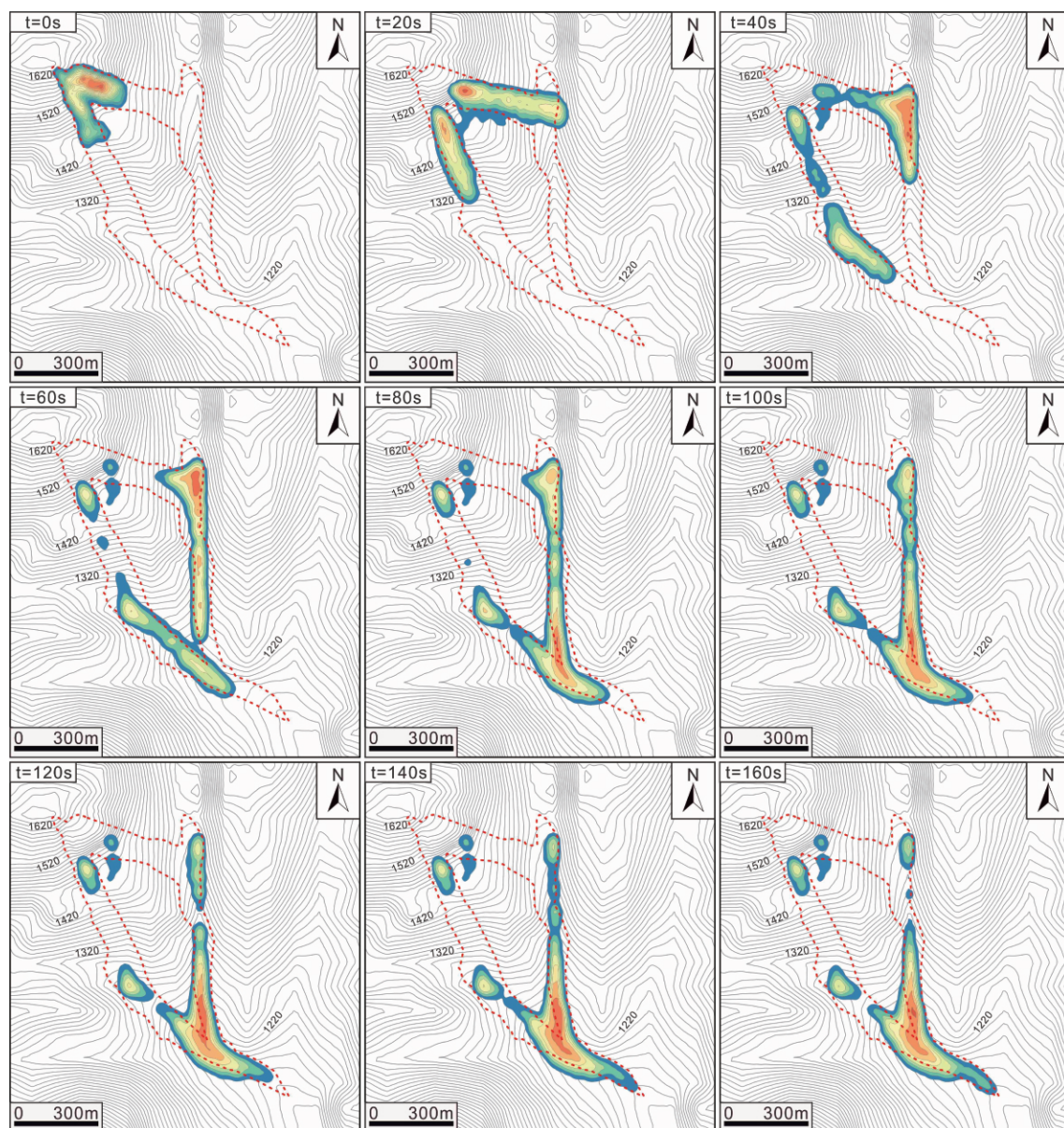


图4 汤家沟崩滑-碎屑流运动过程模拟结果

Fig.4 Time-lapse images of DAN-3D simulation

发现滑体出现了滞留, 交汇区堆积面积变大, 滑体再次发生转向。此刻滑体堆积开始形成, 右侧高程为1250~1280 m段的滑体堆积形态基本成型。

80~140 s阶段 80 s后滑体的运动在干沟头段已不再活跃, 运动主要集中在春尖窝沟和堆积区内。从该时间段滑体的堆积变化和运动距离来看, 滑体的运动明显减缓, 干沟头段滑体的堆积基本不再发生变化, 只在春尖窝沟和堆积区发生较大的变化, 可见干沟头段滑体的最终堆积形成以及运动停止要早于春尖窝沟。该时段内滑体的速度之所以放缓是因为在春尖窝段滑体得不到补充, 且沿途铲刮伴随能量损失, 而堆积区内滑体速度放缓是由于东西两侧

滑体在交汇点再次发生撞击, 消耗了较大的能量所致。另外滑体交汇区域处滑体的堆积明显要厚于其他堆积点。

140~160 s阶段, 对比 $t=140$ s 末和 $t=160$ s 末两张图的堆积变化, 可以看到滑体在堆积区前缘的堆积基本不变, 干沟头段的堆积在140 s时基本形成, 春尖窝段和堆积区内的滑体在160 s末时形成, 整个滑坡路径内的堆积轮廓基本成型, 滑体的运动和堆积处于稳定状态, 不再发生大的变化。与图2现场拍摄的照片进行对比, 以及从现场调查情况来看, 160 s末滑体的堆积和运动特征与实际情况基本吻合, 由此判断滑坡运动的持续时间约为160 s。

对比模拟情况图 4 和滑坡现场堆积情况图 2, DAN3D 能较好的模拟滑体自启动到结束整个过程中的运动、碰撞、铲刮、堆积等现象。滑体的整个运动基本上位于滑坡的轮廓之内,虽然个别位置的堆积特征和实际堆积情况存在偏差,但总体来说模拟效果较为理想。

2.4 堆积体分布特征分析

汤家沟滑坡-碎屑流的最终堆积形态如图 5 所示。

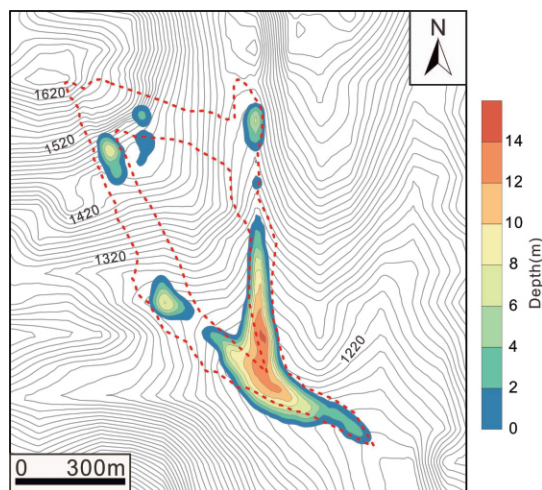


图 5 滑坡堆积体分布数值模拟结果

Fig. 5 Final distribution of the debris at 2 m intervals.

从崩滑体最终的堆积来看,滑体的平均堆积厚度在 7 m 左右,最大堆积厚度约为 16 m,位于高程 1200 ~ 1220 m 春尖窝沟与干沟头沟交汇段。崩塌体与沟槽侧壁撞击位置,滑体的最大堆积约为 10 m,平均厚度在 6 m 左右。上述结果与按 1:10 000 的比例尺生成的 DEM 地形图得到的深度范围大体相同,滑坡最终产生的方量大约在 90 万 m^3 。

2.5 速度特征

滑体在整个运动过程中的最大速度分布如图 6 所示。

由图 6 可见,滑源区的最大运动速度约 24 m/s。左侧滑体与春尖窝沟发生撞击前的最大速度大于 30 m/s (图 1a 位置 A),堆积区滑体的最大速度约为 12 m/s。撞击点的可能速度可以通过经验公式(4)和(5)进行估算。左侧春尖窝沟滑体在撞击点形成爬高 $h = 35$ m,由公式(4)可以估算出滑体速度为 26 m/s。右侧干沟头沟滑体在撞击点形成超高(图 1a 位置 B),由公式(5)可以估算出滑体速度为 17.2 m/s,其中 $d = 15$ m, $r = 300$ m, $b = 150$ m。由图 6 可知,左侧模拟得到的滑体速度与经验公

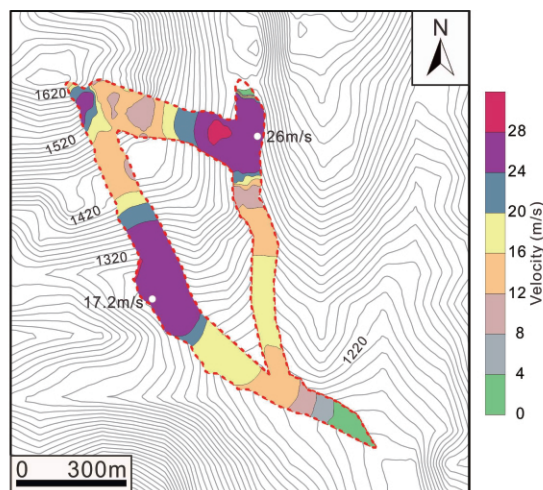


图 6 汤家沟滑坡-碎屑流最大速度分布

Fig. 6 Plot of the maximum simulated flow velocities recorded along the run-out path. The maximum velocity contours are at 4 m/s intervals and the elevation contours are at 10 m intervals.

式估算的速度比较吻合,而右侧小于经验公式得到的滑体速度,这可能与滑体爬高、弯曲半径、滑体宽度的估算存在误差有关,而要得到上述参数的精确值则比较不易,因此也就很难做到模拟出的速度与实际滑体的运动速度完全一致。

2.6 铲刮特征

滑体在整个运动过程中沿途铲刮情况如图 7 所示。

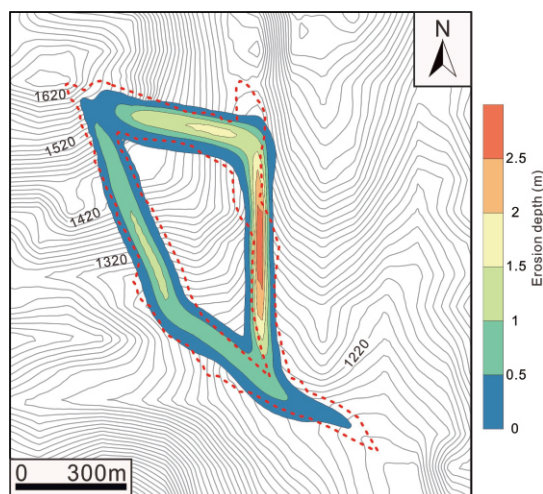


图 7 汤家沟滑坡-碎屑流沿途铲刮分布

Fig. 7 Erosion map for Tangjia valley rock avalanche

由图 7 可见,滑体自滑源区启动后整个运动过程中都伴随着铲刮的发生,左侧滑体平均铲刮深度约为 1.5 m,最大铲刮深度约为 3 m。右侧滑体平均铲刮深度约为 1 m,最大铲刮深度约为 2 m,堆积区

的铲刮较小,最大铲刮深度只有1 m。从铲刮分布图可见左侧滑体对沟槽和表面岩土体的铲刮要比右侧严重,这与现场调查情况相符。

以上分别从滑体的运动、堆积、速度以及铲刮情况进行了模拟分析,得到的模拟结果与滑坡发生后实际的运动情况具有较高的一致性,这说明通过DAN3D动力分析软件对滑坡的动态过程进行模拟可以取得比较理想的结果。

3 结论

2013年4月20日四川省芦山县发生 $M_s 7.0$ 级强烈地震,引发了天全县境内唯一一处规模超过百万方量的大型滑坡-汤家沟滑坡。通过实地考察及相关文献的查阅,本文介绍分析了汤家沟滑坡发生的背景和主要特点,并运用DAN3D动力特性分析软件对滑坡进行了模拟,得到了以下结论:

(1) 汤家沟滑坡是由芦山地震直接引发的高速远程大型滑坡,滑坡的运动距离约为1.6 km,滑源区到堆积区高程差达480 m。汤家沟滑坡的发生具有隐蔽性、突发性以及高位高速的特点,尤其是在单薄山脊两侧同时发生高速整体滑移的现象比较罕见。

(2) 借助DAN3D软件对汤家沟滑坡的整个运动过程进行了模拟,根据滑坡的特点,本文采用了F-V-V模型,通过试错法得到了一组比较理想的运动参数,模拟出了滑坡在整个运动过程中的铲刮、碰撞、堆积等特征。模拟的持续时间约为160 s,最大堆积厚度位于高程1200~1220 m处,达16 m,在该位置的堆积面积稍大于实际的堆积面积,但误差在允许范围之内。滑体的最大速度位于高程1350~1380 m处,达30 m/s,滑体的最大铲刮深度位于高程1250~1310 m处,达3 m。通过模拟结果与实际结果进行对比,发现模拟结果比较理想,这对于相似类型滑坡的分析和预测具有较大的参考意义。

参考文献 (References)

- [1] 殷志强,赵无忌,褚宏亮,等. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析[J]. 地质学报, 2014, **88**(6): 1145–1156. [YIN Zhiqiang, ZHAO Wuji, CHU Hongliang, et al. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan Earthquake and compare to them of Wenchuan Earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, **88**(6): 1145–1156]
- [2] 许冲,徐锡伟,郑文俊,等. 2013年四川省芦山“4.20”7.0级强烈地震触发滑坡[J]. 地震地质, 2013, **35**(3): 641–660.

- [XU Chong, XU Xiwei, ZHENG Wenjun, et al. Landslide triggered by the April 20, 2013 Lushan, Sichuan province $M_s 7.0$ strong earthquake of China [J]. Seismology and Geology, 2013, **35**(3): 641–660]
- [3] 崔鹏,陈晓清,张建强,等. “4.20”芦山7.0级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. 山地学报, 2013, **31**(3): 257–265. [CUI Peng, CHEN Xiaoping, ZHANG Jianqiang, et al. Activities and tendency of mountain hazards induced by the $M_s 7.0$ Lushan earthquake, April 20, 2013 [J]. Mountain Research, 2013, **31**(3): 257–265]
- [4] 张丹丹,常鸣,马国超,等. 四川雅安“4.20”芦山地震龙门乡崩塌滑坡发育分布特征及危险性评估[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, **25**(1): 16–21. [ZHANG Dandan, CHANG Ming, MAO Guochao, et al. The hazard assessment of geological disasters by “4.20” Lushan earthquake in Longmen town of Ya’an, Sichuan province, China [J]. Journal of Geological Hazard and Environment Preservation, 2014, **25**(1): 16–21]
- [5] 胡卸文,顾成壮,牛彦博,等. 芦山地震触发大岩崩滑坡—碎屑流特征与运动过程[J]. 西南交通大学学报, 2013, **48**(4): 590–598. [HU Xiewen, GU Chengzhuang, NIU Yanbo, et al. Debris flow characteristics and movement process of Dayanbeng landslide in Tianquan County triggered by “4.20” Lushan earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, **48**(4): 590–598]
- [6] 徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 2013. 四川芦山7.0级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, **58**(20): 1887–1893. [XU Xiwei, WEN Xueze, HAN Zhujun, et al. 2013. Lushan $M_s 7.0$ earthquake: A blind reverse-fault earthquake [J]. Chin Sci Bull. **58**(20): 1887–1893 (in Chinese).]
- [7] 周庆,江亚风,吴果,等. 芦山地震崩塌灾害空间分布及相关问题探讨[J]. 地震地质, 2014, **36**(2): 344–357. [ZHOU Qing, JIANG Yafeng, WU Guo, et al. Distribution of coseismic landslides in Lushan earthquake and discussion on related problems [J]. Seismology and Geology Seismol Geol, 2014, **36**(2): 344–357]
- [8] 杨庆一. 四川省天全县地质灾害现状分析[J]. 中国煤炭地质, 2009, **21**(5): 64–68. [YANG Qingyi. A analysis of geological hazard status quo in Tianquan County, Sichuan Province [J]. Coal Geology of China, 2009, **21**(5): 64–68]
- [9] 张远娇,邢爱国,朱继良. 汶川地震触发牛沟高速远程滑坡—碎屑流动力学特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, **46**(10): 1665–1670. [ZHANG Yuanjiao, XING Aiguo, ZHU Jiliang. Dynamics analysis of Niuquangou rock slide debris flow triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, **46**(10): 1665–1670]
- [10] 王国章,李滨,冯振,等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑—碎屑流过程模拟[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(5): 101–106. [WANG Guozhang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Simulation on the process of Jiguanling rock avalanche in Wulong area, Chongqing, China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, **41**(5): 101–106]
- [11] BOULTBEE N., 2005. Characterization of the Zymoetz River rock avalanche. M. Sc. thesis, Simon Fraser University, Burnaby.

- [12] HUNGR O. ,1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides , debris flows , and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal* **32**(4) ,610 –623
- [13] HUNGR O. , Evans , S. G. , 1996. Rock avalanche run out prediction using a dynamic model. In: Senneset (Ed.) , Landslides; Proc. intern. symp , Trondheim ,1: 233 –238
- [14] 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. *Engineering Geology* **61** , 29 –51
- [15] 程谦恭,张倬元,黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. *山地学报*,2007 ,**25**(1): 72 – 84. [CHENG Qiangong , ZHANG Zhuoyuan , HUANG Run-qiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report [J]. *Journal of Mountain Science* ,2007 ,**25**(1): 72 – 84]
- [16] 胡卸文,罗刚,黄润秋,等. 唐家山滑坡后壁残留山体震后稳定性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*. 2009 ,**28**(11): 2349 – 2359. [HU Xiewen , LUO Gang , HUANG Runqiu , et al. Study of stability of remnant mountain body in back scarp of Tangjiashan landslide after “5 • 12” Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2009 , **28**(11): 2349 – 2359]
- [17] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. *岩石力学与工程学报*,2009 ,**28**(6): 1239 – 1249. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8. 0 earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2009 , **28**(6): 1239 – 1249]

Dynamic Simulation of Tangjia Valley Rock Avalanche in Tianquan , Sichuan , China

XIA Shiwei , ZHENG Zhaoyang , YUAN Xiaoyi , XING Aiguo *

(Department of Civil Engineering , Shanghai Jiao Tong University , Shanghai 200240 , China)

Abstract: On April 20 , 2013 , a catastrophic rock avalanche was triggered by the Lushan earthquake in Sichuan Province , China. The rock avalanche motivated 530 000 m³ of sandstone from the source area. After detaching from its source area , the slide mass ran down rapidly along the direction of 130° and the displaced materials were divided into two streams as a result of blockages of a small ridge at an elevation of 1480 m. The two debris streams flowed along two valleys after colliding with the ridge. The left part of the displaced materials travelled a distance of 340 m along the direction of 156° , impacting the left side of the Chunjianwo valley and ran up to the side slope at a maximum run-up height of 35 m. A minor portion of the materials flowed upstream , whereas most of the materials continued to flow downstream and finally converged into the right part of the displaced materials at an elevation of 1200 m. The right part of the displaced materials travelled a distance of 440 m along the direction of 104°. The debris superelevated on the right side of the Gangoutou Valley with a height of 15 m , then diverted at an angle of 35° along the valley floor and finally ceased at the Tangjia valley at an elevation of 1160 m. The displaced materials travelled 1 600 m with a descent of 480 m , and the final volume was accumulated to be approximately 1000 000 m³. The basic pattern of this rock avalanche was concluded by a detailed field investigation. It revealed that the rock avalanche resulted in one superelevation in the Gangoutou Valley and a run-up in the Chunjianwo Valley. To understand the post-failure behavior of the rock avalanche , a numerical model (DAN-3D) was used to simulate the landslide propagation. By means of trial and error method , a combination of Frictional model and Voellmy model convinced of the best performance in simulating the rock avalanche propagation according to in site survey of run-out , distribution and thickness of the final deposit. The results of simulation suggested that the rock avalanche had a duration of about 160 s and a maximum velocity of 30 m/s.

Keywords: Lushan earthquake; rock avalanche; numerical simulation; DAN3D model