

文章编号: 1008-2786-(2019)3-371-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000430

沟道偏转地形对滑坡碎屑流运动的影响研究

胡晓波^a, 樊晓一^{a,b*}, 田述军^{a,b}

(西南科技大学 a. 土木工程与建筑学院; b. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 在沟谷地形中, 滑坡碎屑流的运动常受到地形的影响, 导致其运动方向发生改变, 进而影响到滑坡运动速度和堆积特征。本文利用三维离散元素法, 对四川都江堰三溪村高速远程滑坡进行模拟, 研究滑坡体不同部位的块体失稳后, 在沟道偏转地形主导下的滑坡碎屑流前缘的运动速度、各部位滑体的速度变化过程和堆积特征, 并提出沟道偏转地形耗能模型分析了地形偏转造成的动能消耗。研究结果显示: 滑坡前缘在地形偏转位置运动方向发生变化, 导致运动速度突降; 由于滑坡不同部位的滑块相对于地形偏转点具有不同的撞击角度, 导致其撞击后产生不同的偏转角度, 滑块的偏转角度越大, 速度变化越大; 由沟道偏转地形导致的滑坡运动速度减小反映了偏转地形对滑坡的动能产生的耗散, 动能耗散率与 $\cos^2\theta$ (θ 为偏转地形在水平面上的偏转角度) 成反比; 不同部位滑块的堆积长度随偏转角度的增大而减小。本研究分析了沟谷地形偏转对滑坡碎屑流运动速度作用机制及不同部位岩土体堆积范围的影响, 可为该类地形条件下滑坡的运动机制研究和防灾减灾工作提供参考。

关键词: 沟道偏转地形; 运动偏转; 耗能模型; 高速远程滑坡; 离散元模拟

中图分类号: P 642.22

文献标志码: A

我国西南地区地质灾害频发, 特别是 2008 年 5·12 汶川 8.0 级地震后, 引发大量的滑坡和泥石流灾害, 其中高位远程滑坡-碎屑流因其具有规模大、高速、远程的特点^[1-2], 造成大量的人员伤亡和经济损失。最早对滑坡-碎屑流展开研究可追溯到 1881 年瑞士的 Elm 滑坡, Heim^[3] 对该滑坡-碎屑流进行了详细描述。1904 年, McConnell & Brock 对加拿大 Frank 滑坡进行了调查研究, 并首次对滑坡-碎屑流的成因机理进行分析。此后, 空气润滑、颗粒流、能量传递、底部超孔隙水压力等物理模型相继提出。然而, 经验统计预测模型、确定性预测模型和数值模拟预测模型等数理模型^[4], 用于研究滑坡-碎

屑流的运动学规律和动力学机理, 都未能充分考虑沟道偏转地形对滑坡运动机理和动力学机理的影响。研究该类滑坡-碎屑流的运动距离、速度、堆积深度和能量分布, 对于潜在的滑坡-碎屑流的风险评估具有重要的意义。

三溪村滑坡发生于 2013 年 7 月, 属于典型的高速远程滑坡-碎屑流。众多学者对三溪村滑坡展开研究, 主要集中于滑坡的发育特征、启动机理、运动特征、成灾模式等方面^[5-8], 忽略了沟谷地形条件对滑坡的运动学及动力学特征的影响。三溪村滑坡在运动过程中, 受沟谷地形的作用, 滑坡运动方向在偏转位置发生了约 70° 的偏转, 属于典型的偏转型滑

收稿日期 (Received date): 2018-08-04; 修回日期 (Accepted date): 2019-06-23

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41877524, 41401195); 西南科技大学研究生创新基金资助 (19ycx0081)。[National Natural Science Foundation of China (41877524, 41401195); Postgraduate Innovation Fund Project by Southwest University of Science and Technology (19ycx0081)]

作者简介 (Biography): 胡晓波 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害。[HU Xiaobo (1993-), male, M. Sc. candidate, research on geological disaster] E-mail: dzxb@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 樊晓一 (1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及地质灾害方面的教学与研究工作。[FAN Xiaoyi (1974-), male, Ph. D., professor, research directions for geological hazard and geotechnical engineering] E-mail: xyfan1003@126.com

坡^[9]。主要表现为同沟谷两侧山体之间的碰撞冲击作用。类似的滑坡-碎屑流,如贵州关岭滑坡、青川东河口滑坡、牛眠沟滑坡、文家沟滑坡-碎屑流等^[10-12],虽然滑坡启动方式不同,但这些滑坡均受到沟道偏转地形的影响作用,造成滑坡运动方向在地形偏转位置发生偏转。樊晓一等^[9]、赵运会等^[13]、杨海龙等^[14]通过室内模型试验、统计学等手段证实了地形的偏转会导致滑坡碎屑流的运动方向发生偏转,对滑坡碎屑流的运动特征具有重要的影响。但已有的研究还不能完全揭示地形偏转对滑坡碎屑流运动的作用机理,需要做进一步的研究。

本文采用三维离散元法(Particle Flow Code Three Dimension, PFC3D)结合实际调查情况和数值模拟,利用地形数据对 PFC 的力学参数进行标定,结合已有的研究成果,通过对比滑动特征、运动特征、堆积特征等来验证本次数值模拟的有效性。通过对三溪村滑坡运动全过程的反演,并对三溪村滑坡不同部分的速度进行分析,结果表明沟谷偏转地形对滑坡的运动学及动力学行为影响显著,直接影响着滑坡的运动速度演化特征、堆积特征,是高速远程滑坡-碎屑流运动过程中不可忽视的重要因素。研究偏转地形对高速远程滑坡的动力特征的影响,可为该类高速远程滑坡灾害风险评估、预防等提供参考。

1 三溪村滑坡概况

三溪村滑坡位于我国四川省都江堰市中兴镇三溪村 1 组,山体展布呈 NE 方向,处于龙门山断裂带与成都平原过渡地段(图 1)。滑坡区地处一个自然边坡的平缓倾斜带,植被茂盛,森林覆盖率约 99%,被认为是地质灾害的低易发区,特殊的地质地貌特点是发生滑坡的内在因素。受 5.12 汶川地震的影响,三溪村后方的大字岩平台上部开裂形成震裂山体,后经连续三日的强降雨,造成大量水渗入山体形成贯通性裂缝,坡体在高水头压力的作用下被推动滑动^[15]。相关资料显示,滑坡前后缘垂直高差 377 m,后缘到前缘的水平距离为 1240 m,滑源区超百万方岩土体滑下,滑坡总滑程约 1.26 km,造成沟道内 11 户居民建筑被毁。

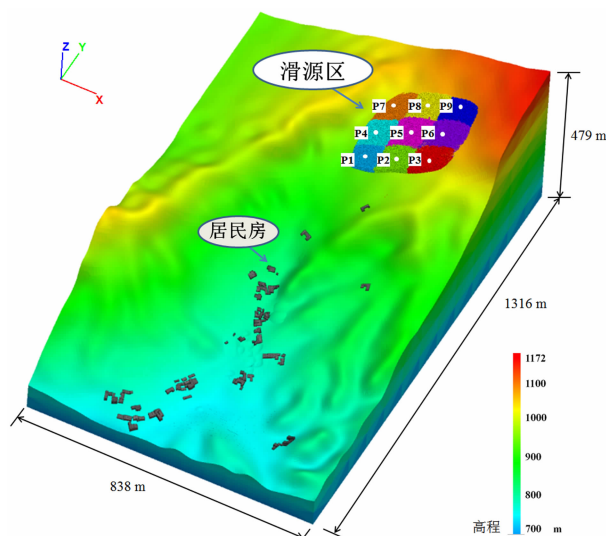


图 1 三溪村滑坡模型图

Fig. 1 Model diagram of a flowing landslide at Sanxi Village

2 离散元软件 PFC3D 建模

2.1 PFC3D 的原理

PFC3D 是基于离散元法的一种用于解决不连续介质问题的数值模拟方法,是由 Cundall 和 Strack 在 1979 年提出的^[16]。PFC 的原理是基于粒子间的接触的位置关系以及相互作用的力学关系来获取粒子的运动状态^[17]。

2.2 三溪村滑坡数值建模

参考以往的滑坡研究,采用墙单元模拟已知滑面,用球单元模拟滑坡体物质^[18-20]。这种数值模拟方法,不需要大量的颗粒数量,极大地减少了运算时间^[21]。如图 1 所示,该模型的横向宽 838 m,纵向长 1316 m,最大高程为 1172 m,堆积最低高程为 738 m,由 103 222 个墙单元组成。滑坡体物质由 64 065 个粒径为 0.6 ~ 1.625 m 的球颗粒组成,并被分成了 9 块区域,用不同颜色表示,用以跟踪研究堆积区物质的来源。

2.2.1 接触模型的选取

为了模拟具有粘结作用的材料运动行为,PFC3D 提供了两种黏结模型,接触黏结模型和平行黏结模型。接触黏结模型只能在接触点传递力,平行黏结模型能够在圆形和矩形截面传递力。模型的详细信息可查阅^[17]。平行黏结模型被广泛用于滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害研究。

2.2.2 岩石土的宏观物理性质和微观参数性质

在 PFC3D 模型中,只能对球单元和墙单元的微观参数进行标定,元素不能直接实现宏观材料的物理性质。据调查,三溪村滑坡区内主要以白垩系粉砂岩为主。通过 PFC3D 建立无侧限单轴压缩实验(图 2),获取应力应变曲线,同室内试件实验对比。通过校核数值模拟的参数,最终使得宏观物理性质同室内测试样品接近。白垩系粉砂岩^[22-23]的单轴抗压强度约 61 MPa,杨氏模量约 11.06 GPa,密度约 2300 kg · m⁻³。

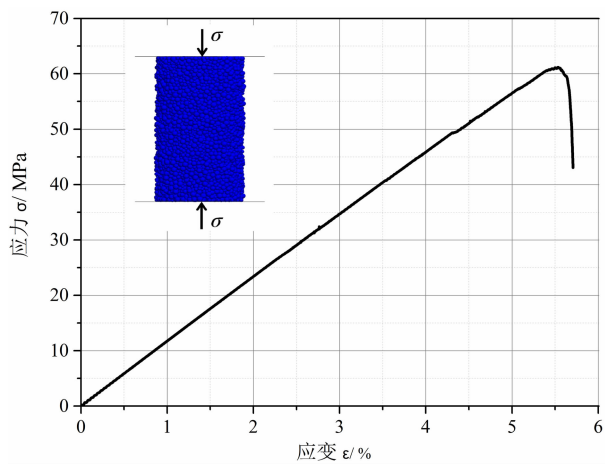


图 2 无侧限抗压实验

Fig. 2 Unconfined compression test

单轴实验和滑坡模型的详细数值参数如表 1 所示。

表 1 PFC 模型参数取值

Tab. 1 The numerical micro-parameters of PFC model

参数	参数名称	单轴压缩实验	滑坡模型参数
	颗粒数量	14 138	64 065
<i>R</i>	最小颗粒半径/m	0.0006	0.65
<i>Rmax/Rmin</i>	最大颗粒与最小颗粒比值	2.50	2.50
<i>ρ</i>	颗粒密度/kg · m ⁻³	2300	2300
<i>kratio</i>	球颗粒刚度比	1.00	1.00
<i>Ec</i>	球颗粒接触模量/GPa	1.48	1.48
<i>Pb_kratio</i>	平行粘结刚度比	1.00	1.00
<i>u</i>	球颗粒摩擦系数	0.677	0.20
<i>σ_c</i>	平行粘结法向强度/Pa	6 × 10 ⁶	6 × 10 ⁶
<i>τ_c</i>	平行粘结切向强度/Pa	6 × 10 ⁶	6 × 10 ⁶
<i>dp_nratio</i>	法向临界阻尼比	0.22	0.22
<i>dp_sratio</i>	切向临界阻尼比	0.20	0.20

已有的研究表明,目前有三种流变模型(摩擦流变学、Voellmy 流变学和 Pouliquen 流变学)用于模拟研究滑坡的快速运动过程,且三种模型得到的流动性和堆积情况都能达到令人满意的精度^[24-25]。但三种模型对控制参数的校准各不相同,其中摩擦流变模型只需要对滑动摩擦角进行校准而广泛得到运用^[26]。因此,选择摩擦流变模型用于本次滑坡的研究。

三溪村滑坡是在构造应力和重力联合作用下接触面发生应力集中,加之静水压力的作用,导致原生结构发生破坏而失稳^[15]。本研究通过控制颗粒与墙体的摩擦系数,将其与滑动面的抗剪强度降低相结合,模拟滑坡的失稳破坏。滑坡未启动前,坡体处于平衡状态,设置较高的摩擦系数 0.677。由于斜坡岩体节理裂隙发育,随着原生结构面的破坏,滑坡启动后,岩体迅速破碎液化,抗剪强度迅速降低到一个残余值,经过对残余摩擦系数进行校核,墙体的滑动摩擦系数最终确定为 0.21,这与杜国梁^[15]实验测得的滑动面摩擦系数 $f \approx 0.21$ ($\varphi \approx 12^\circ$) 一致。

3 三溪村滑坡的运动学及动力学特征

3.1 数值模拟结果

3.1.1 数值模拟堆积结果

三溪村滑坡从启动到堆积停止,大约用了 80 s 的时间,滑坡总滑程约 1.14 km。滑源区前缘分布高约 100 m 的临空面及陡崖。滑坡岩土体失稳后,快速崩落、破碎解体形成碎屑流。受沟谷地形的作用,滑坡碎屑流运动 450 m 后,运动方向由 NE57° 转向 NE10°,继续运动了 550 m,最终造成三溪村 11 户房屋被掩埋破坏。综合已有资料^[6-9],三溪村滑坡分为 1[#]、2[#] 两处滑坡,本次研究主要研究 1[#] 滑坡(图 3),滑坡堆积区前缘的高程约 740 ~ 755 m,堆积长度约 520 ~ 560 m,宽约 50 ~ 150 m,堆积厚度约 5 ~ 15 m。本次模拟的数值结果测量显示(图 4),堆积区后缘高程 850 m,前缘高程 740 m,堆积长度约 560 m,宽 50 ~ 140 m,堆积厚度 5 ~ 15 m,同实际调查情况一致。对比图 3 和图 4 中 3 处居民房屋、公路的位置,房屋、公路位置基本一致。综合以上数据本次模拟结果,虽然同实际堆积结果存在一定的误差,但本文主要研究沟道偏转地形对滑坡碎屑流的运动速度、堆积的影响,一定程度上是合理可靠的。

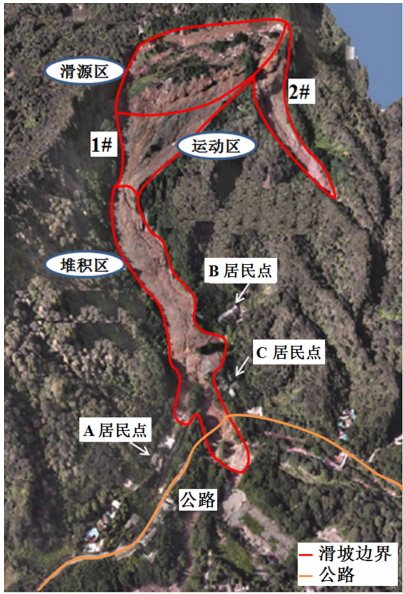


图3 滑坡发生后的遥感影像图^[6]
Fig.3 Remote sensing image after landslide

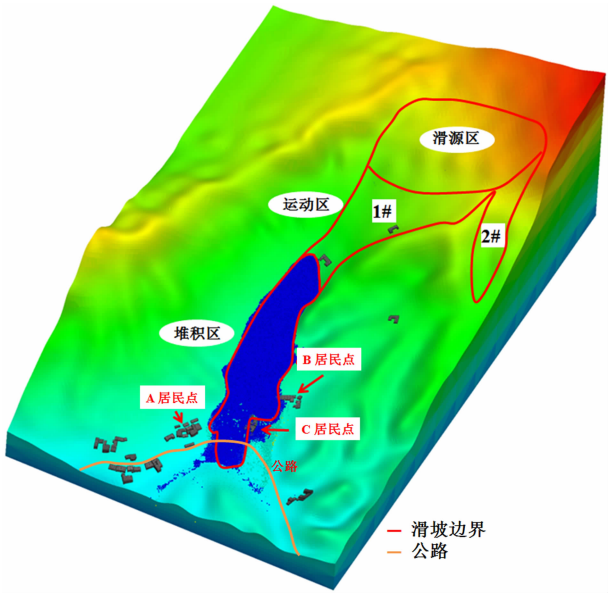


图4 滑坡模型数值模拟堆积结果
Fig.4 Numerical simulation of landslide accumulation

3.1.2 数值模拟速度演化过程

模拟结果图5显示,滑坡体前缘的初始速度为0,岩土体受剪切作用发生破坏。在重力作用下,岩体崩落破碎,速度迅速增加,运动至300 m ($t = 7.5\text{ s}$)位置处,前缘速度达到20 m/s。经过 $t = 19.5\text{ s}$ 的时间,滑坡体进入山谷,到达沟谷中D居民点(图4所示),速度达到35 m/s。进入山谷时,岩土体受沟谷地形影响,岩土体同对面山体发生碰撞运动方向发生偏转,速度迅速减小至27.3 m/s,

时间间隔 $\Delta t = 22.3 - 19.5 = 2.8\text{ s}$ 。之后,在56 s时刻,前缘滑坡体运动至D居民点处,前缘速度降至10 m/s,时间间隔 $\Delta t = 56 - 22.3 = 34.7\text{ s}$ 。最后,速度逐渐减小,在大约80 s时刻,滑坡体趋于稳定。

三溪村滑坡碎屑流在运动过程中经历了三个地形坡度和一次地形偏转。因此,其前缘运动速度在平均坡度为 45° 的地形区段发生了急加速变化;在平均坡度 23° 的地形区段产生了缓加速变化;在运动方向偏转区段产生了速度突降;在平均地形坡度

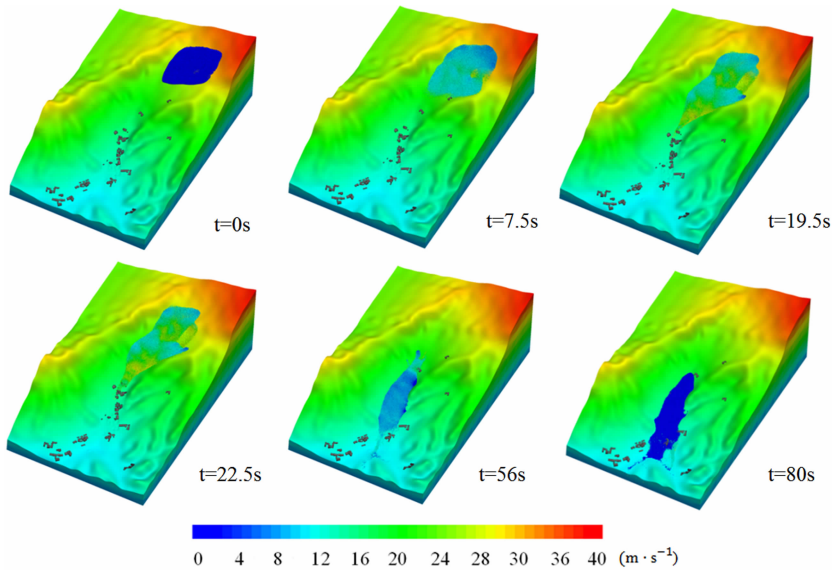


图5 不同时刻滑坡运动演化过程
Fig.5 Movement process of the landslide at times

9°区段,运动速度逐渐减小,直至运动停滞。

图 6 显示,有学者采用不同的模拟计算方法,滑坡体的运动速度不同位置的变化曲线存在差异,但速度演化总体趋势基本一致,表明本次数值模拟结果是合理的。在文献[5]和文献[27]三溪村滑坡运动速度研究中,将滑坡后缘的速度设置为 0,滑坡运动速度经历加速和减速两个阶段,其最大速度分别为 32.6、39.7 m/s。其原因在于对滑坡运动速度的分析采用二维模型和 Scheidegger 模型,未能充分考虑滑坡运动受三维地形效应的影响。在文献[6]中,将滑坡前缘的速度设置为 0,与本研究分析滑坡前缘运动速度的方法一致,获得滑坡前缘运动速度

的变化规律为急加速阶段、缓加速阶段、速度突降和减速阶段^[6]。杨海龙等^[14]开展受沟谷偏转的滑坡运动室内模型实验,证实了滑坡体速度会在偏转位置发生突变。在文献[6]和本次模拟充分考虑地形因素的影响,速度表现出更强的波动性,同实际情况更加接近。在文献[6]中采用 DAN2D 模型选取了主滑方向偏左的剖面对滑坡进行模拟,受坡脚地形的作用,滑坡体速度在坡脚位置处发生突变。本次模拟采用更接近实际的三维地形,岩土体运动至坡脚位置处,同地面和沟谷山体发生碰撞致使速度发生了突降。模拟结果显示,速度发生突变的位置存在偏差,这同剖面位置的选取有关。

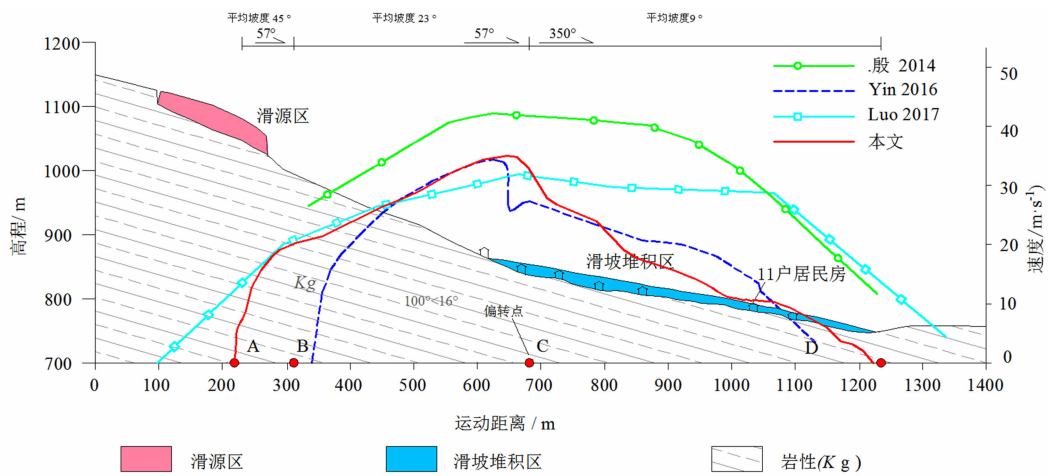


图 6 三溪村滑坡速度与水平距离的关系

Fig. 6 Sanxicun landslide velocities versus horizontal distance found by Yin et al. (2014, 2016) and Luo 2017, and this study

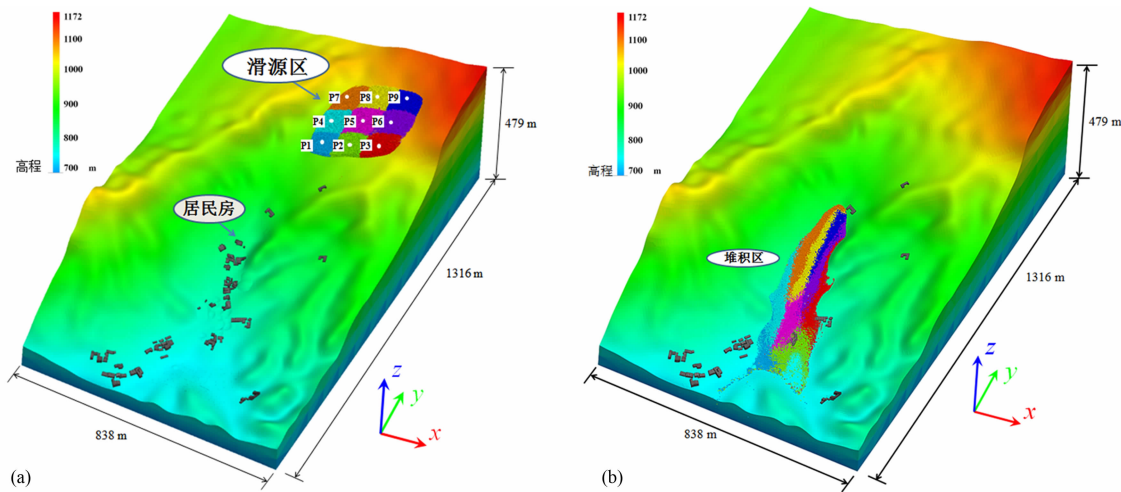


图 7 滑坡发生前后模型图

(a) 滑坡发生前模型图; (b) 滑坡发生后模型图

Fig. 7 The model of landslide evolution (a) Model diagram before landslide; (b) Model diagram after landslide

3.2 滑坡速度

3.2.1 不同部位滑体的速度情况

滑坡体不同部位相对于碰撞偏转点的高差和偏转角度的差异,其运动速度表现为不同的演化特征。为揭示偏转效应对滑坡流动的动力学特征,将滑坡体分为了9个部分,P1~P3、P4~P6、P7~P9分别代表滑坡体的前部、中部、后部岩土体,并对每个部位岩土体的速度进行监测。图7(a)显示了滑坡运动前的各部位的位置分布,图7(b)显示了各部位岩土体运动堆积分布结果。

图8(a)表明,前部岩土体约4 s时间内,速度迅速增加到13 m/s。经过6 s的持速运动后,在12 s时,速度再次出现加速运动,达到最大速度。在30 s时刻开始进入减速阶段,用了约6 s的时间,速度便从28 m/s减速到了10 m/s;然而,速度从10 m/s降到3 m/s却用了25 s。

图8(b)表明,中部岩土体P4~P6经过约6 s钟时间,速度增加到13 m/s。后速度波动起伏,速度在10~20 m/s范围内波动,经过28 s的持续高速

运动后,岩土体运动至坡脚偏转位置处,即进入减速堆积阶段。用了约6 s时间,速度从18 m/s降至8 m/s。

图8(c)表明,后部岩土体前期经过3 s的短暂加速,速度增加到约7 m/s;经过了约13 s的缓慢加速运动,在15 s时刻速度再次迅速增加,峰值速度约27 m/s;再次经过约20 s的持速运动后,进入减速阶段,速度迅速降为0。

滑坡前部岩土体P1~P3的速度表现为加速、峰值速度、速度突降、速度缓慢减小的变化阶段。虽然P1~P3都位于滑坡前部,但各部分在运动至地形偏转点之前,经历了不同的地形坡度和偏转角度,导致其运动速度峰值时间和运动过程存在一定的差异。P1点位于滑坡前部右侧,较P2、P3运动到偏转点前所经历的路程短、地形坡度大,达到峰值速度所运动的时间少,约为12 s。其中P3的速度经历了约70°的大角度偏转,在28~32 s时刻内,速度受沟道地形偏转的影响,速度迅速从20 m/s减小至8 m/s。相比于P1、P2速度在偏转位置处突降更加明显。

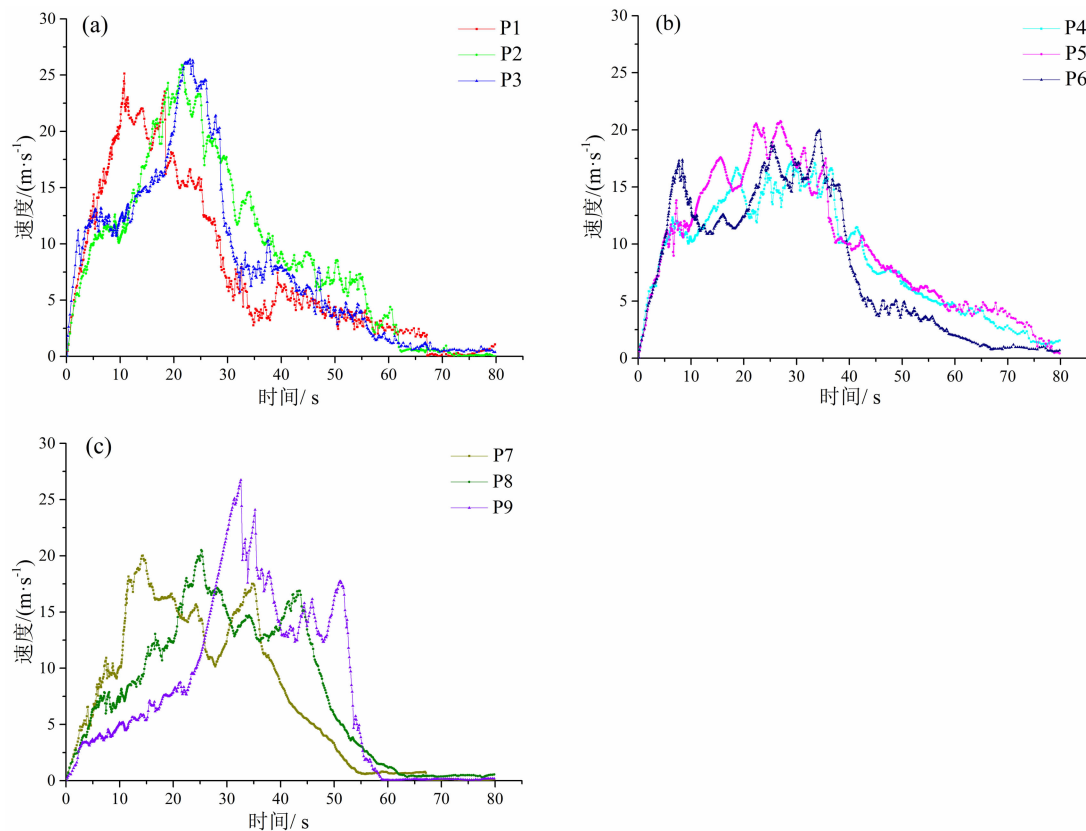


图8 P1~P9速度随时间变化曲线:(a) P1~P3颗粒的总速度;(b) P4~P6颗粒的总速度;(c) P7~P9颗粒的总速度

Fig. 8 Change of the velocity verse time for particles P1~P9: (a) velocity of particle (P1~P3); (a) velocity of particle (P4~P6); (a) velocity of particle (P7~P9)

滑坡中部岩土体 P4 ~ P6 的速度表现为加速、持速、速度突降、速度缓慢减小的变化过程。相比于前部岩土体,中部岩土体持速阶段明显。中部岩土体受前部岩土体的阻碍和后部岩土体推挤作用下,峰值速度更小,但持速时间明显增加。中部岩土体在持速时间段,速度变化的波动性减弱。中部岩土体同样受沟道地形偏转的影响,P6 的速度突降比 P5、P4 更加明显。

滑坡后部岩土体 P7 ~ P9 的速度表现为加速、缓慢加速、快速加速、持速、速度突降的过程。后部岩土体相比于前、中部土体,受中部岩土体的阻碍,而没有受到向前的推挤作用,因此减速堆积时间更短,没有缓慢堆积过程。后部岩土体受沟道偏转地形的影响,P9 的速度突降比 P8、P7 更明显。

图 8(a)(b)(c) 表明,后部土体从启动到运动停止的时间最短,用了约 60 s 的时间完成了整个运动堆积过程。前缘岩土体表现出较高的运动性,前期加速运动具有较高的速度,受中后部土体的推挤作用较小;当运动至沟谷,受地形条件的影响,速度迅速减小,且此时受中、后部岩土体的推挤作用明显,速度并未降到零,前缘土体仍能保持相对较高的速度运动。

3.2.2 沟道偏转地形对球颗粒 x 、 y 、 z 方向速度的影响

图 7 所示,建立空间直角坐标系,分别表示了 x 、 y 、 z 的坐标指向。将颗粒总速度分解为 x 、 y 、 z 方向上的速度,图 9(a) ~ (i) 分别是 P1 ~ P9 沿 x 、 y 、 z 轴方向的速度变化情况。图中显示,颗粒在 x 轴方向具有较高的速度,最大速度达到了 18 m/s。图 9(a) 前部岩土体 P1、P2、P3 具有相同的峰值速度,而 P1、P2、P3 的 x 方向的最大速度分别是 10、13、18 m/s,这与不同部分岩土体运动过程中经历的地形有关,P1、P2、P3 颗粒的运动方向分别发生了约 45° 、 55° 、 70° 的偏转。当岩土体运动至坡脚位置处, x 方向的速度都出现了突降,P1、P2、P3 在速度突降阶段速度变化量分别为 12、17、23 m/s。经过坡脚处受沟道偏转地形的影响,P3、P2、P1 的动能都减少了,且偏转角度越大动能减少越多。

中部、后部岩土体均受到沟道地形偏转的影响,表现出同前部岩土体相同的规律特征。沟道地形的偏转是导致滑坡体运动方向发生偏转的主要原因,沟道地形偏转作用对岩土体的速度变化具有重要的

影响,从而对岩土体的动能产生影响。

以 P1、P2、P3 为例,对比图 9 中(a)(d)(g)可知,三个方向的速度均有出现速度突降的情况。P1、P2、P3 分别在 10 s、25 s、28 s 时刻附近 x 方向的速度出现突降,而此时此刻附近 y 、 z 方向的速度未出现明显的速度突降,仍保持持速或加速的状态。即地形的偏转主要影响岩土体 x 方向上的速度,对 y 、 z 方向上的影响不显著。且 z 方向的速度出现多次突降的情况,主要和地形剖面内地形的起伏变化有关,同地形的偏转无关。P4 ~ P9 均出现类似的情况。

3.3 沟道偏转地形耗能模型

受沟谷地形条件的影响,位于同一高度不同位置的滑坡岩土体,在运动到沟道地形的偏转点,其地形的偏转角度和坡度不同,将表现出不同的运动速度变化特征。岩土体同沟谷地形发生强烈的撞击作用,导致运动速度大小和方向发生变化,对滑坡运动能量产生耗散作用。为了解释沟道地形的偏转对滑坡碎屑流动能的消耗作用,提出如下沟谷偏转地形耗能模型。对于此类高速远程滑坡,滑坡碎屑流在运动至偏转点处时,处于高速运动的状态,同山体之间的碰撞作用时间较短,因此可认为发生碰撞过程的时间很短,碰撞过程中,不考虑摩擦的耗能。即本模型更适用于高速远程滑坡过程中受沟道偏转地形的情况。

建立如图 10 所示的三维坐标系,总速度 v 可分解为三个方向的速度 v_x 、 v_y 、 v_z 。本模型在实际具有沟谷偏转地形的滑坡中,确定坐标系至关重要,以偏转点为坐标原点,沟谷地形偏转后的水平方向为 y 轴(即滑坡碎屑流受沟谷地形作用运动方向发生偏转后的运动水平方向),垂直于水平面为 z 轴,垂直于 y 、 z 轴为 x 轴。图 10 中,坐标原点 O 代表岩土体运动方向发生偏转的位置,颗粒沿着 AOB 路径运动,颗粒在 O 点受地形影响运动方向发生偏转,即偏转前速度为 v_1 ,发生偏转后,速度为 v_2 ,受沟谷地形横向的约束作用 v_2 横向速度 v_{2x} 速度减小至 0,剩下 yoz 面内的速度。

偏转前总速度 v_1 同分速度的关系可表示如下:

$$\begin{cases} v_{1x} = v_1 \cos \alpha_1 \sin \theta \\ v_{1y} = v_1 \cos \alpha_1 \cos \theta \\ v_{1z} = v_1 \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$v_1^2 = v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2 \quad (2)$$

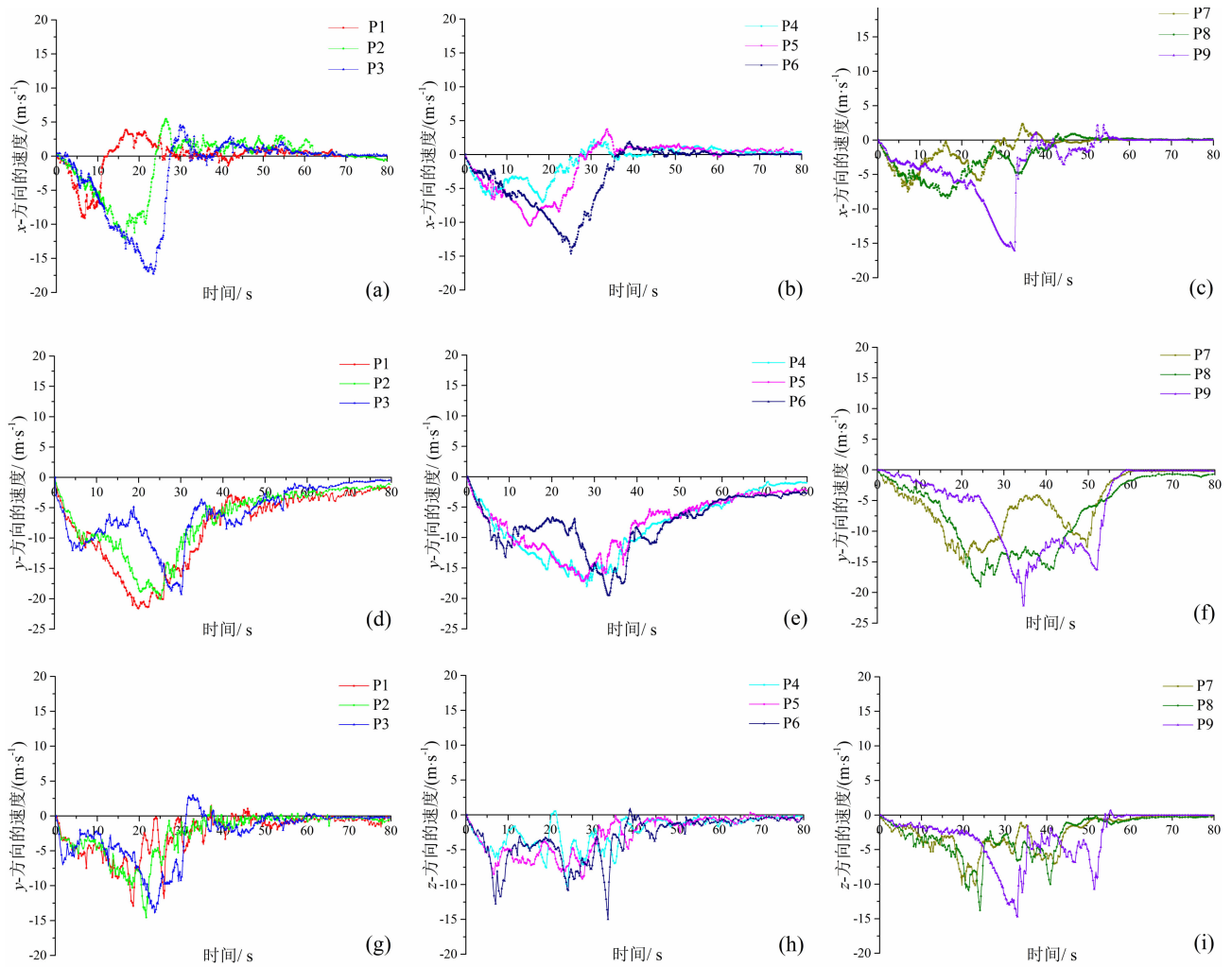


图9 P1 ~ P9 在 x 、 y 、 z 轴方向的速度随时间变化曲线 (a) P1 ~ P3 颗粒 x 方向上的速度; (b) P4 ~ P6 颗粒 x 方向上的速度; (c) P7 ~ P9 颗粒 x 方向上的速度; (d) P1 ~ P3 颗粒 y 方向上的速度; (e) P4 ~ P6 颗粒 y 方向上的速度; (f) P7 ~ P9 颗粒 y 方向上的速度; (g) P1 ~ P3 颗粒 z 方向上的速度; (h) P4 ~ P6 颗粒 z 方向上的速度; (i) P7 ~ P9 颗粒 z 方向上的速度

Fig.9 Change of the velocity verse time in three directions for particles P1 ~ P9; (a) x -velocity of particle (P1 ~ P3); (b) x -velocity of particle (P4 ~ P6); (c) x -velocity of particle (P7 ~ P9); (d) y -velocity of particle (P1 ~ P3); (e) y -velocity of particle (P4 ~ P6); (f) y -velocity of particle (P7 ~ P9); (g) z -velocity of particle (P1 ~ P3); (h) z -velocity of particle (P4 ~ P6); (i) z -velocity of particle (P7 ~ P9) ~

偏转后总速度 v_2 同分速度的关系:

$$\begin{cases} v_{2x} = 0 \\ v_{2y} = v_2 \cos \alpha_2 \\ v_{2z} = v_2 \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$v_2^2 = v_{2y}^2 + v_{2z}^2 \quad (4)$$

且 $v_{1y} = v_{2y}$, 则有

$$v_1 \cos \alpha_1 \cos \theta = v_2 \cos \alpha_2 \quad (5)$$

α_1 表示颗粒偏转前斜坡的坡度; α_2 表示偏转后斜坡的坡度; θ 表示颗粒运动方向在水平面投影的偏转角度。

经过坡脚偏转位置后, 动能的消耗率为:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} = 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} = 1 - \frac{\cos^2 \alpha_1 \cos^2 \theta}{\cos^2 \alpha_2} \quad (6)$$

η 为岩土体经过坡脚位置处, 动能的消耗率。

坡脚位置的动能消耗率 η 受 α_1 、 α_2 、 θ 三个因素的影响, α_1 、 θ 的角度越大, η 值越大, α_2 角度越小, η 值越小。

从图 7(a) 中可以看出, 滑坡前部的 P1、P2、P3 岩土体启动前位于同一高程位置, 偏转点之后的运动方向一致, 设 P1、P2、P3 在经历偏转点后的偏转

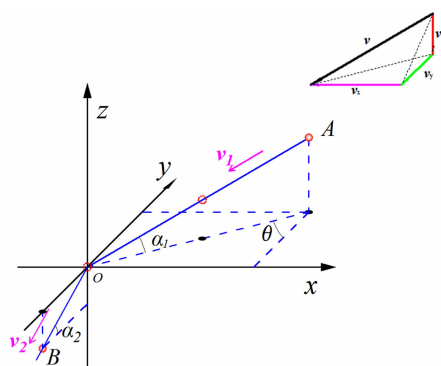


图10 沟道偏转地形耗能模型

Fig. 10 Energy dissipation model of channel deflection

角度为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 因此 $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$, 在偏转后经历了基本一致的地形条件, 其偏转后的运动距离 $P1 > P2 > P3$, 表明偏转角度越大, 滑坡碎屑流的动能消耗越多, 运动堆积距离越近。类似的, 中部和后部的岩土体也表现出相同的运动特征。

3.4 滑坡分块堆积特征

将岩土体分成9个部分, 监测9个部分的堆积情况如图7(b)所示。对9个部分岩土体的堆积长度进行测量, 结果如图11。前部(P1、P2、P3)岩土体堆积长度最长、中部(P4、P5、P6)其次、后部(P7、P8、P9)岩土体堆积长度最短。P2堆积长度最长为440 m, P9的堆积长度最短为290 m。前部岩土体受后部岩土体的推挤作用, 后部岩土体受到前部的岩土体的阻止, 使得前部岩土体的平均堆积长度更长。

相同高程的滑块堆积长度同样存在差异, 沿滑坡运动方向左侧的滑块(P3、P6、P9)滑坡体相比于

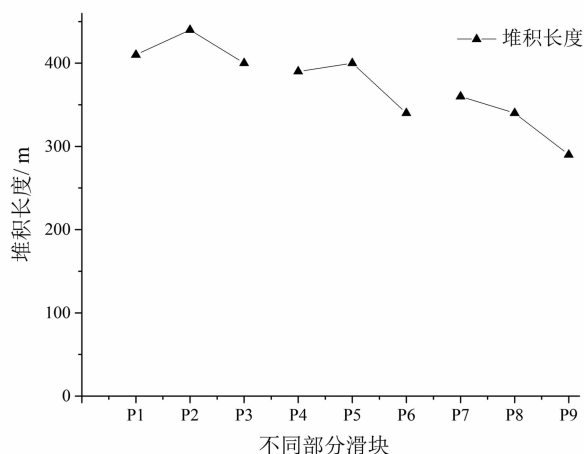


图11 不同部分岩土体堆积长度统计表

Fig. 11 The accumulation lengths in different parts of rock and soil mass

相同高程部分的滑块具有更短的堆积长度。相同条件下, 左侧岩土体受沟谷地形的偏转作用明显。左侧滑块运动至坡脚处, 受沟谷地形挤压, 运动方向发生了 $60^\circ \sim 80^\circ$ 的大角度偏转, 消耗了更多的动能, 岩土体的运动性减弱明显。滑坡分块堆积长度的特征还显示, 滑坡前部和中部的右侧滑块(P1和P4)虽然受沟道地形偏转的角度相对较小, 但堆积长度小于中间部分的滑块(P2和P5), 其原因在于右侧滑块还受到沟谷地形侧面摩擦作用, 其产生相对更多的能量消耗。

4 结论

利用颗粒流软件 PFC3D 对三溪村滑坡运动过程进行了反演, 探究了三溪村滑坡岩土体受沟道地形的影响, 分析了不同部分岩土体运动方向发生偏转时, 滑体的运动速度、堆积、能量变化的特征, 并提出沟道偏转地形耗能模型, 总结了沟道偏转地形对动能消耗率的影响。结论如下:

(1) 滑坡前缘运动速度受地形偏转的影响, 经历了加速运动、速度突降和减速运动阶段。沟道偏转地形是导致 x 方向速度发生突降的主要原因。

(2) 不同部分滑坡碎屑流块体的运动速度存在较大差异。前部、中部、后部岩土体运动速度分别表现为短单峰型、长单峰型、短双峰型特征。

(3) 通过对不同部分的岩土体速度进行监测表明, 不同部分岩土体在偏转位置 x 方向上的速度突降差异明显。主要原因是: 不同部分的岩土体发生了不同角度的偏转, 偏转角度越大, 对动能的消耗越多。

(4) 基于数值模拟结果的定性分析提出了沟道偏转地形耗能模型, 表明沟道偏转地形对动能的消耗率受 α_1 、 α_2 、 θ 三个因素的影响, α_1 、 θ 与动能消耗率呈正相关关系, α_2 与动能消耗率呈负相关关系。

(5) 沟道地形的偏转也影响了滑坡不同滑块的堆积长度, 沿滑坡运动方向左侧滑块的偏转角度最大, 其堆积长度最小; 滑坡前部和中部的右侧滑块受沟谷地形侧面摩擦作用产生更多的能量消耗, 其堆积长度小于中间部分滑块。

参考文献 (References)

[1] 刘传正. 论崩塌滑坡—碎屑流高速远程问题[J]. 地质论评,

- 2017, **63**(6):1563–1575. [LIU Chuazheng. Research on high speed and long-distance of the avalanches or landslide-debris streams [J]. Geological Review, 2017, **63**(6):1563–1575]
- [2] 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 Runqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report[J]. Mountain Research, 2007, **25**(1):72–84]
- [3] HEIM A. Der Bergsturz von Elm [J]. Deutsch Geol Gesell Zeitschr, 1882, **34**(1):74–115.
- [4] 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 Ming, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6):805–817]
- [5] 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 Zhiqiang, XU Yongqiang, ZHAO Wuji. Sanxi village landslide in dujiangyan, sichuan province on July 10, 2013 [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(2):309–318]
- [6] YIN Yueping, CHENG Yuliang, LIANG Jingtao, et al. Heavy-rainfall induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms. 8.0 earthquake [J]. Landslides, 2016, **13**(1):9–23.
- [7] 王佳运, 张茂省, 贾俊, 等. 都江堰中兴镇高位滑坡泥石流灾害致灾成因与发展趋势[J]. 西北地质, 2014, **47**(3):157–164. [WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. The cause and development of the high-locality landslide and debris flow disaster of Zhongxing town, Dujiangyan city[J]. Northwestern Geology, 2014, **47**(3):157–164]
- [8] 温铭生, 方志伟, 王阳谷. 都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因[J]. 现代地质, 2015, **29**(2):448–453. [WEN Minsheng, FANG Zhiwei, WANG Yanggu. Characteristics and disaster causes of Wulipo landslide in Dujiangyan city [J]. Geoscience, 2015, **29**(2):448–453]
- [9] 樊晓一, 冷晓玉, 段晓冬. 坡脚型与偏转型地震滑坡运动距离及地形因素作用[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5):1380–1388. [FAN Xiaoyi, LENG Xiaoyu, DUAN Xiaodong. Influence of topographical factors on movement distances of toe-type and turning-type landslides triggered by earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5):1380–1388]
- [10] 孙萍, 张永双, 殷跃平, 等. 东河口滑坡—碎屑流高速远程运移机制探讨[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(6):737–744. [SUN Ping, ZHANG Yongshuang, YIN Yueping. Discussion on long run-out sliding mechanism of Donghekou landslide-debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(6):737–744]
- [11] 孔纪名, 崔云, 田述军, 等. 地震碎裂滑动型滑坡发育特点及典型实例分析[J]. 工程科学与技术, 2009, **41**(3):119–124. [KONG Jiming, CUI Yun, TIAN Shujun, et al. Typical case study on the development characteristics of fragmentation-sliding seismic landslide[J]. Advanced Engineering Sciences, 2009 **41**(3):119–124]
- [12] 王涛, 石菊松, 吴树仁, 等. 汶川地震触发文家沟高速远程滑坡—碎屑流成因机理分析[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(5):631–644. [WANG Tao, SHI Jusong, WU Shuren, et al. Formation mechanism of Wenjiagou high-speed and long-runout debris avalanche triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(5):631–644]
- [13] 赵运会, 樊晓一, 王海瓜, 等. 偏转型滑坡滑动与堆积影响因素研究[J]. 人民长江, 2017, **48**(3):48–52. [ZHAO Yunhui, FAN Xiaoyi, WANG Haigua, et al. Study on influential factors on movement and accumulation of turning-type landslide[J]. Yangtze River, 2017, **48**(3):48–52]
- [14] 杨海龙, 樊晓一, 赵运会, 等. 偏转角度对滑坡—碎屑流运动影响的模型试验[J]. 山地学报, 2017, **35**(3):316–322. [YANG Hailong, FAN Xiaoyi, ZHAO Yunhui, et al. Model tests on influence of deflection angle on the movement of landslide-debris avalanches[J]. Mountain Research, 2017, **35**(3):316–322]
- [15] 杜国梁, 张永双, 姚鑫, 等. 都江堰市五里坡高位滑坡—碎屑流成因机制分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(s2):493–501. [DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, YAO Xin, et al. Formation mechanism analysis of Wulipo landslide-debris flow in Dujiangyan city[J]. Rock & Soil Mechanics, 2016, **37**(s2):493–501]
- [16] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, **29**(1):47–65.
- [17] ITASCA. PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) version 5.0[Z]. Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2018: 205–215.
- [18] TANG C L, HU J C, LIN Ming-lang, et al. The tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: insights from a discrete element simulation[J]. Engineering Geology, 2009, **106**(1/2):1–19.
- [19] LO C M, LIN Minglang, TANG C L, et al. A kinematic model of the Hsialin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit[J]. Engineering Geology, 2011, **123**(1/2, SI):22–39.
- [20] ZHOU Jiawen, HUANG Kangxin, SHI Chong, et al. Discrete element modeling of the mass movement and loose material supplying the gully process of a debris avalanche in the Bayi Gully, Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, **99**:95–111.
- [21] CHANG K J, TABOADA A. Discrete element simulation of the Jiufengershan rock-and-soil avalanche triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2009, **114**(F04099).
- [22] 常士骅. 工程地质手册:第4版[K]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007:167–168. [Chang Shibiao, Engineering geological

- manual; 4th ed. [K]. Beijing: China Building Industry Press, 2007:167–168]
- [23] 林志红, 项伟, 张云明. 湘西红砂岩基本物理指标和微结构参数对其强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1):124–133. [LIN Zhihong, XIANG Wei, ZHANG Yunming. Experimental research on influences of physical indices and microstructure parameters on strength properties of red stone from Western Hunan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2010, **29**(1):124–133]
- [24] CROSTA G B, CHEN H, LEE C F. Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps[J]. Geomorphology, 2004, **60**(1): 127–146.
- [25] PIRULLI M, MANGENEY. Results of back-analysis of the propagation of rock avalanches as a function of the assumed rheology[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, **41**(1): 59–84.
- [26] LI Weichao, LI Hongjie, DAI F C, et al. Discrete element modeling of a rainfall-induced flowslide[J]. Engineering Geology, 2012, **149**(4): 22–34.
- [27] LUO Yu, LIU Wei, HE Siming, et al. Dynamic process simulation of rainfall-induced Sanxicun landslide based on a thermo-poro-elastic approach[J]. Natural Hazards, 2018, **92**(1): 415–428.

Influence of Channel Deflection on the Movement of A flowing Landslide

HU Xiaobo^a, FAN Xiaoyi^{a,b,*}, TIAN Shujun^{a,b}

(*a. School of civil engineering and architecture; b. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China*)

Abstract: In the gully terrain, the movements of flowing landslide are often affected by local relief, resulting in a change in the direction of motion, which in turn affects the speed and accumulation characteristics of the landslide. In this paper, three-dimensional Particle Flow Code (PFC3D) was used to simulate a high-speed long-distance landslide at Sanxi Village, Dujiangyan City, Sichuan Province. After numerically investigation on the instability at different parts of the landslide body, it analyzed the movement speed of the leading edge of the landslide subjected to channel deflection, the process of speed change in each sliding part and the associated accumulation formation. Then a terrain deflection channel energy model was introduced to analyze the kinetic energy consumption caused by terrain deflection. Results showed that the front edge of the flowing landslide changed in the directions of movements at the places with terrain deflection in gully, resulting in a sudden drop in speed; Since the sliders at different parts of the landslide had different impact angles with respect to turning points of terrain, it generated a varied of deflection angles in movement after it hit the points; The larger the deflection angle, the greater change in velocity took place for a slider; The dissipation of landslide motion energy because of channel deflection can interpret the decrease in movement speed, and the dissipation rate was inversely proportional to $\cos\theta$ (θ is horizontal deflection angle); The stacking length of a slider at different parts of the landslide decreased with the increase in deflection angle. In this study it conducted a research on the leading role of terrain deflection in governing the behavior of flowing landslide in a gully as well as its influence range on sliders at different parts of the landslide. It could provide reference for study of the movement mechanism of flowing landslides in the similar topographical conditions as well as for engineering in disaster prevention and mitigation.

Key words: deflection channel terrain; deflection movement; energy model; high-speed remote landslide; discrete element simulation