

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.02

引用格式: 徐伟,朱志明,铁永波,等.地震作用下康定市郭达山危岩带运动特征[J].中国地质调查,2022,9(4):10-18.
(Xu W,Zhu Z M,Tie Y B,et al. Movement characteristics of rockfall under earthquake in Guoda Mountain of Kangding City[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):10-18.)

地震作用下康定市郭达山危岩带运动特征

徐伟^{1,2},朱志明³,铁永波¹,袁传保⁴

(1.中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都 610081;2.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;3.武汉地质工程勘察院有限公司,湖北武汉 430050;4.中铁二院工程集团有限责任公司,四川成都 610031)

摘要:康定地区多为深切河谷地貌,山坡陡峻,基岩裸露,崩塌落石多发,地震频发。为开展地震作用下崩塌运动特征和规律研究,以康定市郭达山危岩带为研究对象,采用颗粒流离散元软件(particle flow code in 2 dimension, PFC^{2D})模拟危岩带不同部位崩塌源(坡顶孤石、坡体上部碎裂岩体、坡体中部老崩塌堆积体、坡体下部块状危岩)在面波震级(surface wave magnitude, Ms) 8.0地震作用下的运动特征和破坏过程。研究结果表明:①坡顶孤石质量越小越易启动,孤石越接近球形越易发生倾覆和滚动,沿临空面飞出后运动类型以坠落、碰撞、滚动为主,坡顶孤石的运动速率最大时达11.8 m/s;②坡体上部碎裂岩体破坏过程可分为裂隙延伸贯通—启动坠落—碰撞解体—滚动堆积4个阶段,位于碎裂岩体上部的块石运动距离最远,达269 m;③老崩塌堆积体块石自前向后形成碎屑流,沿坡面运动类型以滚动、碰撞为主;④下部块状危岩运动特征为启动—滑动—挤压—解体—再滑动—再挤压—堆积;⑤不同部位的崩塌在运动过程中块石会发生碰撞、摩擦、挤压、解体,快速消耗自身动能,导致运动距离和速率骤降。采用离散元模拟能够更全面更精细化的认识深切河谷区的崩塌,可为崩塌灾害的工程治理和山区城镇的防灾减灾提供科学依据。

关键词:康定市;郭达山危岩带;运动特征

中图分类号: P681.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)04-0010-09

0 引言

崩塌和落石是山区常见的地质灾害现象,具有发生时间不定、崩落速度快、垂直坠落的特点。崩塌危害巨大且影响因素众多,尤其在我国西部山区,极其复杂的地形地质条件、脆弱的生态环境、频发的地震活动,更容易产生崩塌落石等地质灾害,这对人民生命财产安全和国家经济发展产生极大影响^[1-2]。因此开展地震作用下的崩塌落石动力学特性、成因机制等研究具有十分重要的意义。

20世纪以来,国内外学者围绕着地震作用下的危岩崩塌动力学特性、成因机制等做了大量研究工作,主要研究方法有理论分析、现场调查、无人机倾斜摄影测量技术、数值模拟和室内试验等。通过现

场调查和运动特征参数计算,研究了崩塌滚石运动特征^[3-6];采用数值模拟方法,再现不同破坏模式崩塌失稳的运动特性^[7-9]、崩塌全过程^[10-11]、形成机理^[12-14]、崩塌前兆特征^[15]、稳定性分析^[16]。采用室内试验的研究方法,如砂堆模型离心试验^[17]模拟地震作用下崩塌动力学特性、振动台试验模拟不同因素对崩塌失稳破坏时间^[18]和落石运动距离^[19]的影响。采用无人机倾斜摄影测量技术,查明崩塌体特征和成因^[20]。采用贴近摄影测量技术开展高位崩塌早期识别^[21]。

前人对同一危岩带不同部位的崩塌源同时进行研究和分析的较少。现实中,较大规模的崩塌落石灾害或危岩带往往同时发育多个不同部位的崩塌源,因此,开展地震作用下危岩带不同部位崩塌

收稿日期:2022-03-03;修订日期:2022-07-13。

基金项目:中国地质调查局“川西地区特大地质灾害链调查评价(编号:DD20221746)”项目资助。

第一作者简介:徐伟(1986—),男,高级工程师,主要从事地质灾害调查评价和岩土体稳定性研究工作。Email:052054@163.com。

源的变形破坏过程研究是十分必要的。

1 郭达山危岩带概况

康定市为四川省甘孜州首府所在地,地质构造活动强烈,山体破碎,河谷深切,强地震频发。郭达山危岩带位于康定市主城区郭达街后山,瓦斯河左岸(图 1)。郭达山危岩带,多次地震时均发生了高位崩塌落石,直接威胁山脚下康定市区近 3 000 人的生命财产安全和 G318 国道的安全畅通。在前期的调查和初步研究中,对郭达山危岩带的工程地质条件、演化历史、崩塌分区(1 区、2 区、3 区)特征、典型危岩体特征等进行了详细描述^[5]。本次研究布设了一条贯穿崩塌 1 区、2 区的剖面线(图 2),采用颗粒流离散元软件(particle flow code in 2 dimension,PFC^{2D})对郭达山危岩带上的坡顶孤石、上部

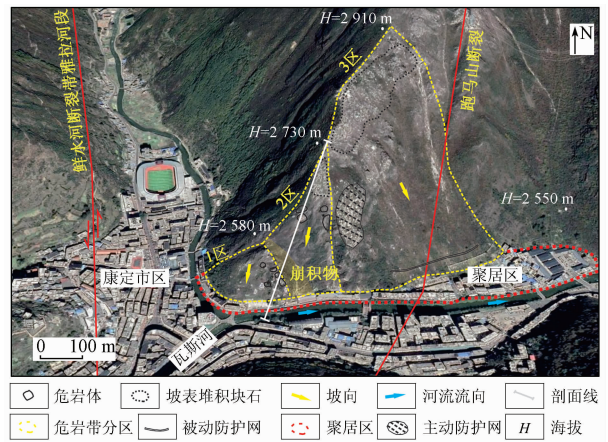


图 1 郭达山危岩带全貌

Fig. 1 Panorama of fallrock belt in Guoda Mountain

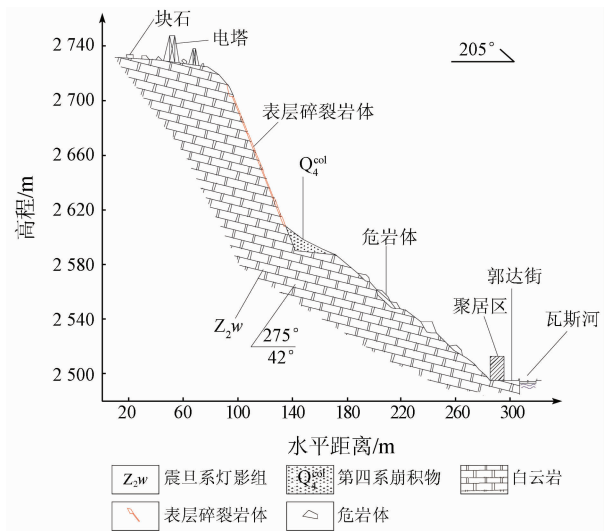


图 2 郭达山危岩带剖面

Fig. 2 Profile of fallrock belt in Guoda Mountain

碎裂岩体、中部老崩塌堆积体、下部块状危岩在面波震级(surface ware magnitude,Ms) 8.0 地震作用下的破坏过程和运动特征进行了数值模拟。

2 模型的建立

采用二维颗粒流离散元软件 PFC^{2D}进行数值模拟,对郭达山危岩带上的典型危岩体在不同地震动荷载作用下崩塌过程、崩塌路径进行模拟预测,最终得到不同地震动荷载下的危害范围。依据图 2 采用实际尺寸建模,模型高 240 m,宽 300 m。基岩面上有 3 种类型的危岩体:一是位于坡顶和坡下缘的孤立块石(R1 ~ R11);二是位于坡体中部的老崩塌堆积体(A12);三是坡体中上部的浅表层强风化碎裂岩体(i 段、ii 段)。在上述崩塌源上选取了 27 个观测点(P1 ~ P27)(图 3)。

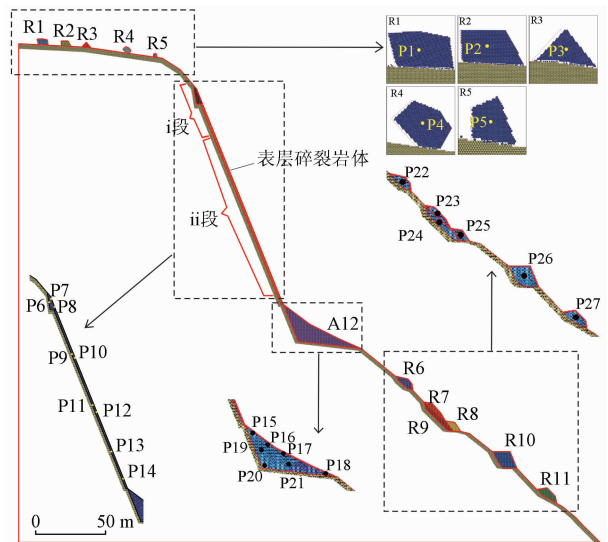


图 3 郭达山危岩带二维离散元模型及观测点位置

Fig. 3 Two dimensional discrete element model and observation point position of fallrock belt in Guoda Mountain

根据表层碎裂岩体厚度的不同划分为厚度约 3 m 的上段(i 段)和厚度为 1 m 的下段(ii 段)。地面调查获取表层碎裂岩体岩层的产状为 275°∠42°,基岩中主要发育有 3 组节理裂隙,产状分别为 100°∠70°、353°∠49°、154°∠68°,临空面危岩体可能发生的崩塌类型为倾倒式和拉裂式。为了使模拟最大限度地还原该区域的真实情况,在 PFC 模型中随机植入虚拟节理裂隙,其长度介于 0.5 ~ 2 m,倾角服从高斯分布,平均值为 30°,标准差为

15°,节理裂隙的数量假定为 50 条。

基岩与所有危岩体均由半径为 0.05 m 的圆盘构成。在地震作用过程中,假定基岩不变形,只传递地震波,因此可采用 Clump 功能模块,将构成基岩的所有颗粒组合成块,在水平方向震动,竖直方向不震动。采用线性平行黏结模型将组成岩块的小球黏结在一起,通过模拟岩体的压裂试验,标定相关细观参数。完整的岩块具有类似白云岩的强度,在达到极限强度时会开裂。松散堆积物采用线性接触黏结模型,圆形颗粒会导致强度弱化,采用弱黏性来等效颗粒不规则形状的影响。局部风化岩层采用线性平行黏结模型,但在岩层中随机加入结构面(discrete fracture network,DFN),结构面上的接触为光滑节理模型,用于模拟结构面力学性质。岩块与基岩面之间设置了贯通的结构面,结构面上的接触模型为光滑节理模型。松散堆积物与基岩接触面采用赫兹模型。模拟过程中产生的新接触均默认采用赫兹接触模型。颗粒之间新的接触涉及碰撞问题,因此在接触上设置了阻尼,作用是模拟碰撞导致的能量损失,因为岩块的崩塌类似于自由

落体运动,因此颗粒的局部阻尼设置为 0。不同位置崩塌源模型组合见表 1。

表 1 不同位置崩塌源模型组合
Tab.1 Combined of collapse source
models at different locations

不同部位崩塌源		模型名称
坡顶大块孤石	块石内部	线性平行黏结模型
	块石与坡面	光滑节理模型
上部表层碎裂岩体	块石内部	线性平行黏结模型
	岩体结构面	光滑节理模型
中部老崩塌堆积体	堆积体内部	线性接触黏结模型
	堆积体与坡面	赫兹模型
下部队状危岩	块石内部	线性平行黏结模型
	块石与坡面	光滑节理模型

3 参数选取

上述接触模型需要进行细观参数的选取和校核,以确保模拟结果具有较高的准确度。通过现场取样和开展完整岩块的压裂试验、岩体结构面滑移试验,根据得到的试验数据并结合前人经验,确定平行黏结模型细观参数和光滑节理模型细观参数(表 2、表 3)。

表 2 线性平行黏结模型细观参数
Tab.2 Meso - parameters of parallel bond model

模型	Bond Gap	Emod (linear)	Kratio (linear)	Emod (pb)	Kratio (pb)	Pb_ten	Pb_coh	Pb_fa	Dp_nratio	Fric
平行黏结	0.5×10^{-4}	1.0×10^9	1.0	1.0×10^9	1.0	10×10^6	50×10^6	0.0	0.5	0.577

表 3 光滑节理模型细观参数
Tab.3 Meso - parameters of smooth joint model

模型	$Kn/(N \cdot m^{-1})$	$Ks/(N \cdot m^{-1})$	Fric	$Da/(^{\circ})$	Ten/Pa	Shear/Pa	Cohe/Pa	Fa	Large
光滑节理	2×10^9	2×10^9	0.577	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1

由于基岩与危岩体接触面的连通率无法精确,在此考虑最危险的情况,即所有结构面均为贯通状态,结构面连通率为 100%。采用简谐波模拟地震时岩体的震动(表 4),动荷载施加于基岩上,使基岩在水平方向上服从简谐振动。虽然采用规律的简谐运动加载方式与实际地震随机性有偏差,但是随着简谐振幅不断提高,可以研究地震对危岩体崩塌运动过程的影响。具体参照文献[22]中的赫兹接触模型及球(块)的细观参数(表 5)。

表 4 动荷载条件
Tab.4 Dynamic load condition

地震震级	振幅/m	频率/Hz	持续时间/s
Ms 8.0	2.50	4	120

表 5 赫兹接触模型及球(块)的细观参数
Tab.5 Hertz contact model and meso - parameters of spheres (blocks)

接触模型与参数	剪切模量	泊松比	摩擦系数	阻尼系数	阻尼比
Hertz	2.45×10^{10}	0.3	0.35	—	0.5
ball	2.45×10^{10}	0.3	0.35	0.0	—

4 不同类型崩塌源的运动过程分析

提取 27 个观测点在地震作用 120 s 过程中的水平位移数据,得到各点的水平位移 - 时间曲线(表 6),通过 PFC^{2D}的轨迹追踪功能,得到各点的运动轨迹,对不同类型崩塌源的运动特征进一步深入分析。

表 6 各观测点运动特征统计

Tab.6 Statistical of movement characteristics of each observation point

观测点 编号	水平位 移量/m	平均速率/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	主要运动类型	观测点水平位移-时间曲线图
P1	1.6	0.013	滑动	
P2	0.3	0.003	滑动	
P3	2.3	0.019	滑动	
P4	152.0	1.267	滚动→坠落→沿临空面碰撞弹跳→落地碰撞→滚动堆积	
P5	155.0	1.292	滚动→坠落→沿临空面碰撞弹跳→落地碰撞→滚动堆积	
P6	229.0	1.908	坠落→沿临空面碰撞弹跳→滚动堆积	
P7	124.0	1.033	坠落→沿临空面碰撞弹跳→滚动堆积	
P8	132.0	1.100	坠落→沿临空面碰撞解体→滚动堆积	
P9	269.0	2.242	坠落→沿临空面碰撞弹跳→滚动→坠落、弹跳→滚动堆积	
P10	93.0	0.775	坠落→滚动→堆积	
P11	73.0	0.608	坠落→滚动→堆积	
P12	77.0	0.642	坠落→滚动→堆积	
P13	42.0	0.350	坠落→滚动→堆积	
P14	28.0	0.233	坠落→滚动→堆积	
P15	27.0	0.225	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P16	24.0	0.200	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P17	26.0	0.217	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P18	192.0	1.600	碎屑流启动→滚动→块石挤压碰撞→堆积	
P19	17.0	0.142	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P20	22.0	0.183	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P21	0.7	0.006	块石挤压碰撞→匀速前移→堆积	
P23	48.0	0.400	滑动→挤压→堆积	
P24	40.0	0.333	滑动→挤压→堆积	
P25	83.0	0.692	滑动→挤压→滑动→堆积	

(续表)

观测点 编号	水平位 移量/m	平均速率/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	主要运动类型	观测点水平位移-时间曲线图
P22	110.0	0.917	滑动→块石挤压→ 滑动→挤压堆积	
P26	63.0	0.525	滑动→解体→沿坡 面滑动→挤压堆积	
P27	50.0	0.417	滑动→块石挤压→ 堆积	

4.1 坡顶孤石

不同几何形态和质量 的孤石在地震作用下的运动特征是不同的,原因在于孤石能否启动取决于底面静摩擦力的大小,启动后运动距离的远近取决于滑动摩擦力或滚动摩擦力的大小。在地震力相同的情况下,孤石质量越大,提供的正压力越大,摩擦力越大;孤石的质量越小,或与地面接触面积越小,摩擦力越小。在郭达山坡顶选取不同几何形状和质量 的孤石为研究对象,选取孤石的中心点 P1 ~ P5 为观测点,如图 3、表 7 所示。

表 7 孤石特征统计表

Tab.7 Statistical table of boulder stone features

孤石编号	平面形状	面积/m ²	质量排序
R1	近似长方形	3.0	①
R2	近似长方形	2.6	②
R3	三角形	1.7	④
R4	六边形	2.4	③
R5	四边形	1.6	⑤

坡顶孤石观测点 P5 的运动路径如图 4 所示。郭达山坡顶区域坡面较为平缓,在地震力作用初期,孤石受自身重力、底面摩擦力和地震力共同作用,R1 ~ R5 在水平方向做往复摆动,产生的水平位移量较小。在地震力的持续作用下,孤石因形状和质量不同,运动特征差异明显,长方形的 R1、R2 以及三角形的 R3 以滑动为主,R3 水平位移最大,为 2.3 m;而六边形的 R4、不规则四边形 R5 由于摆动幅度过大,导致重心不稳发生倾覆,向前滚动,在坡顶端飞出坠落,并沿陡立的碎裂岩体表面发生碰撞后再坠落,最终堆积在斜坡中部的老崩塌堆积体上。R4、R5 最终水平位移分别为 152 m 和 155 m。P4、P5 观测点坠落过程的平均速度为 11.8 m/s 和 10 m/s。

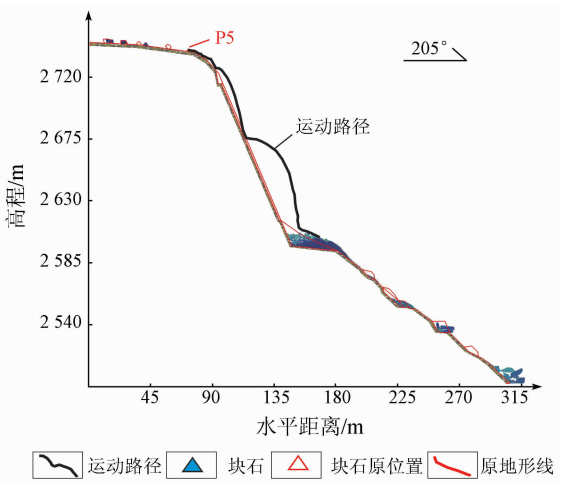


图 4 P5 运动路径

Fig.4 Movement path of P5

4.2 坡体上部碎裂岩体

表层碎裂岩体观测点 P8 的运动路径如图 5 所示。坡体中上部的浅表层强风化碎裂岩体在地震荷载作用下的破坏过程如图 6 所示。由于表层碎裂岩体范围较大,截取部分上段和部分下段进行

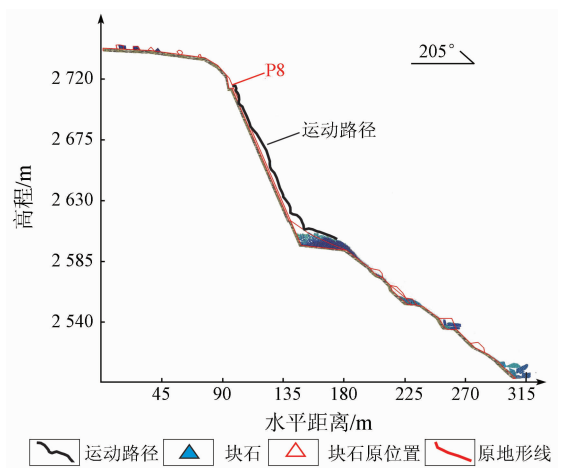


图 5 P8 运动路径

Fig.5 Movement path of P8

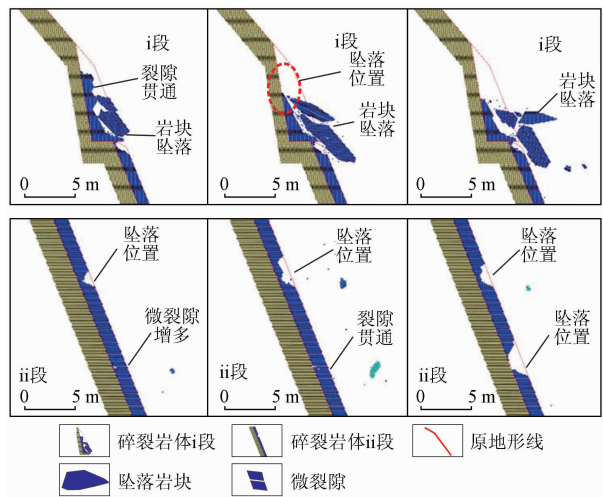


图 6 碎裂岩体破坏过程

Fig. 6 Failure process of cataclastic rock mass

观察。表层碎裂岩体的破坏过程为节理裂隙由外向内延伸,微裂隙增多—裂隙贯通形成独立岩块—岩块掉落,碎裂解体。

分析各观测点的运动特征,可归纳为裂隙延伸贯通—启动坠落—碰撞解体—滚动堆积 4 个运动过程。

(1)裂隙延伸贯通阶段。地震波通过结构面时,会发生不同程度的反射和折射,节理裂隙处易形成应力集中,应力被放大,由于岩体的抗拉强度低,会造成岩体沿原有结构面由外向内不断延伸或产生新的结构面,岩体中岩桥断裂,裂隙贯通后形成独立岩块。观测点 P6 ~ P8 的水平位移—时间曲线上可明显看出,该阶段分别持续了 49 s、16 s、16 s。

(2)启动坠落阶段。地震荷载对岩石块体也起到了推动作用,在潜在滑移面产生较大的剪应力,当其大于软弱结构面的抗剪强度时,岩块失稳启动以一定初速度发生坠落。随着地震力的持续作用,表层碎裂岩体上震落的岩块越多,岩块在空中做自由落体运动。

(3)碰撞解体—滚动堆积阶段。由图 6 可知,岩块在坠落的过程中会与坡面或者其他岩块发生碰撞、弹跳甚至解体,并且坠落的过程是快速的,用时很短。观测点 P6 在 49 ~ 67 s 时间段内发生坠落,短短 18 s 内,水平位移增量为 207 m,平均速率达 11.5 m/s。观测点 P9 在 0 ~ 8.3 s 时间段内沿碎裂岩体陡坡段坠落,水平位移增量为 92 m,平均速率达 11.1 m/s,然后在 8.3 ~ 24.6 s 时间段内沿老崩塌堆积体发生滚动,24.6 ~ 56 s 时间段内向坡脚

方向继续坠落,水平位移增量为 156 m,平均速率达 5 m/s,最终撞击坡脚建筑物,并解体堆积于坡脚处。

4.3 坡体中部老崩塌堆积体

老崩塌堆积体呈锥状,体积约 12 100 m³,主要物质组成为块石、碎石,老崩塌堆积体破坏过程如图 7 所示。其变形破坏过程为:在地震作用下,堆积体内部块石相互摩擦和滚动碰撞,整体向临空面启动前移,堆积体前部块碎石最先沿坡面滚下形成碎屑流,由于地形变陡,碎屑流向下运动的动能增大,并与斜坡下部块状危岩碰撞,碎屑流部分撞击坡脚房屋,部分停留于坡面上;中后部碎石块至地震结束时已整体前移至前端。

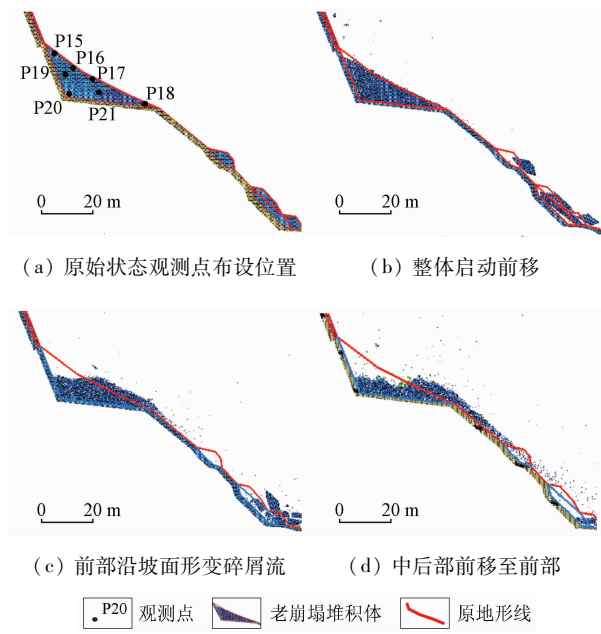


图 7 老崩塌堆积体破坏过程

Fig. 7 Failure process of old collapse accumulation

分析老崩塌堆积体各观测点运动特征可知: P18 位于堆积体前端,地震作用下最先形成碎屑流,快速沿坡面滚动,在 0 ~ 26.5 s 时间段内,水平位移增量达 192 m,速度达 7.2 m/s,最终撞击并堆积在坡脚处。观测点 P15 ~ P17、P19 ~ P21 位于堆积体中部和后部,在地震力开始作用时,有短暂的加速过程,随着地震力的持续,转为接近于匀速运动的前移,最终地震结束时,前移至堆积体的前部,水平位移最大的为 P15,水平位移增量为 26.8 m。

4.4 坡体下部块状危岩

下部块状危岩的单个体积多为 100 ~ 320 m³ (图 8),其变形破坏过程为小块危岩先启动、大块危岩后启动,沿坡面滑动一块石间相互挤压、解体,

动能迅速释放—继续沿坡面滑动,块石间相互挤压、堆积。

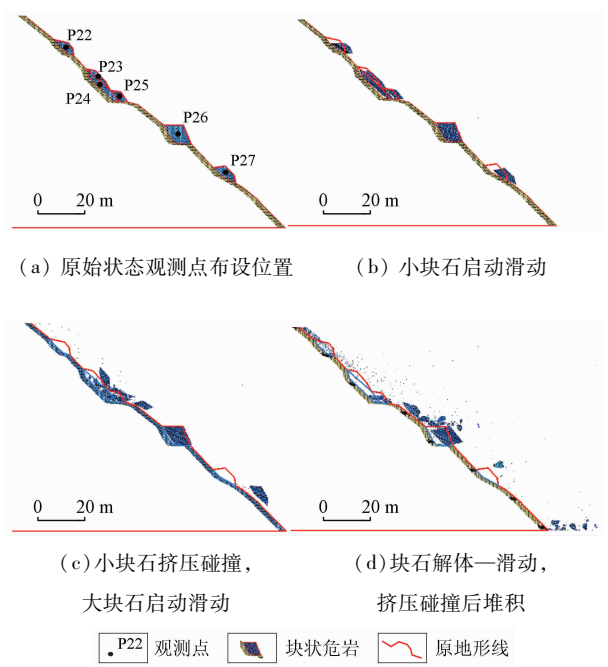


图8 下部块状危岩破坏过程

Fig.3 Failure process of lower massive fallrock

下部块状危岩 P22 的运动轨迹如图 9 所示。分析各观测点运动特征可知:以 P22 为例,整个运动过程先后经历了启动—沿坡面滑动—块石挤压—沿坡面滑动—挤压堆积。2 次沿坡面滑动过程的平均速率分别为 2.25 m/s、1.86 m/s,块石挤压过程的平均速率为 0.85 m/s,速率受块石挤压影响下降幅度约 62%,可以看出块石的互相挤压对于自身动能的损耗明显。以 P26 为例,由于该危岩质量

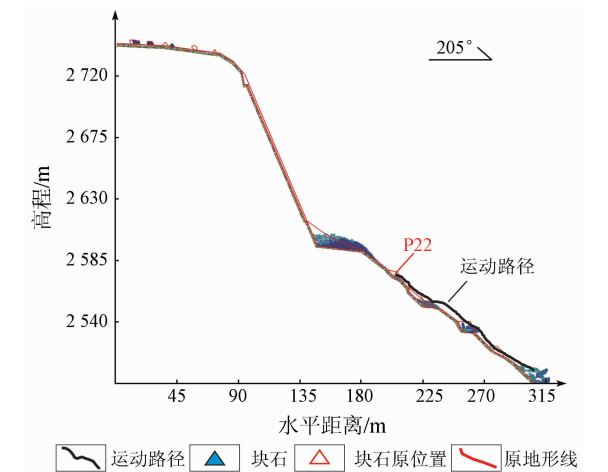


图9 P22 运动轨迹

Fig.9 Movement path of P22

大于其他危岩,所以启动时间较其他危岩明显滞后,地震持续作用 55 s 后才启动,整个运动过程为启动—沿坡面滑动—解体—沿坡面滑动—挤压堆积。2 次沿坡面滑动过程的平均速率分别为 4.37 m/s、0.23 m/s,速率受解体影响下降幅度约为 95%,综合可以看出块石解体后自身动能呈断崖式下降,损耗严重。

5 结论

以康定市郭达山危岩带为研究对象,采用二维颗粒流离散元软件 PFC^{2D} 模拟了 Ms 8.0 地震作用 120 s 时,坡顶孤石、坡体上部碎裂岩体、坡体中部老崩塌堆积体、坡体下部块状危岩 4 类崩塌源的运动特征和破坏过程。

(1) 不同类型崩塌源在运动过程中,是滑动、滚动、坠落、碰撞、弹跳、挤压等多种类型运动的组合,块石的碰撞、摩擦、挤压、解体会快速消耗自身动能,导致运动距离和速率骤降。在郭达山危岩带 4 类崩塌源上选取 27 个观测点, P9 观测点的运动距离最远,达 269 m, P4 观测点的运动速率最大,达 11.8 m/s。

(2) 坡顶孤石质量越小越易启动,孤石越接近球形越易发生倾覆和滚动,沿临空面飞出后运动类型以坠落、碰撞、滚动为主,最终堆积在斜坡中部的老崩塌堆积体上。

(3) 上部碎裂岩体破坏过程可分为裂隙延伸贯通—启动坠落—碰撞解体—滚动堆积 4 个阶段。坠落阶段的水平位移增量和平均速率明显大于滚动阶段。下部块状危岩运动特征为启动—滑动—挤压—解体—再滑动—再挤压—堆积。块石运动速率受挤压、解体影响下降幅度大。

(4) 老崩塌堆积体前部的块石形成规模逐渐增大的碎屑流,碎屑流运动过程中伴随着底面铲刮裹挟作用,沿坡面运动类型以滚动、碰撞为主,参与碎屑流运动的块石水平位移增量达远大于未参与碎屑流运动的块石。

(5) 不同动荷载条件(地震)下,不同类型及其部位的孤石、崩塌堆积体和碎裂岩体的变形破坏过程特征分析,对深切峡谷区域城镇建设规划、防灾减灾工程措施的制定具有重要意义。下一步将对不同地震震级条件下,崩塌落石的变形破坏过程进行模拟研究。

参考文献(References):

- [1] 李秀珍,钟卫,张小刚,等. 川藏交通廊道滑坡崩塌灾害对道路工程的危害方式分析[J]. 工程地质学报,2017,25(5): 1245-1251.
Li X Z,Zhong W,Zhang X G,et al. Hazard ways of landslides and avalanches on road engineering in Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. J Eng Geol,2017,25(5):1245-1251.
- [2] 杨志华,张永双,郭长宝,等. 青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析[J]. 工程地质学报,2018,26(3):673-683.
Yang Z H,Zhang Y S,Guo C B,et al. Sensitivity analysis on causative factors of geohazards in eastern margin of Tibetan Plateau[J]. J Eng Geol,2018,26(3):673-683.
- [3] 裴向军,黄润秋,裴钻,等. 强震触发崩塌滚石运动特征研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):498-504.
Pei X J,Huang R Q,Pei Z,et al. Analysis on the movement characteristics of rolling rock on slope caused by intensive earthquake[J]. J Eng Geol,2011,19(4):498-504.
- [4] 蔡红刚,裴向军,吴景华,等. 强震抛射型崩塌滚石运动特征研究[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2011,12(3): 1-4,20.
Cai H G,Pei X J,Wu J H,et al. Research on the movement features of rock fall by strong earthquake projection type collapse[J]. J Changchun Inst Technol:Nat Sci Ed,2011,12(3):1-4,20.
- [5] 徐伟,张云,梅朱寅. 郭达山后山危岩带特征分析及危险性评价[J]. 山地学报,2016,34(6):741-748.
Xu W,Zhang Y,Mei Z Y. Characteristic analysis and risk assessment of Guo Dashan Mount[J]. Mt Res,2016,34(6):741-748.
- [6] 杨志法,魏雪云,孙亚丽,等. 世界地质公园方山两宜亭景点落石灾害成因及其防治对策研究[J]. 工程地质学报,2019,27(6):1339-1349.
Yang Z F,Wei X Y,Sun Y L,et al. Study on the cause of rockfall disaster and its prevention in Liangyi Pavilion scenic spot of the world geopark Fangshan[J]. J Eng Geol,2019,27(6):1339-1349.
- [7] 黄小福,张迎宾,赵兴权,等. 地震条件下危岩崩塌运动特性的初步探讨[J]. 岩土力学,2017,38(2):583-592.
Huang X F,Zhang Y B,Zhao X Q,et al. A preliminary study of kinetic characteristic of rock-fall under seismic loading[J]. Rock Soil Mech,2017,38(2):583-592.
- [8] 杨龙伟,魏云杰,彭令,等. 新疆维吾尔自治区乌恰县康苏红层崩塌运动学特征研究[J]. 工程地质学报,2020,28(3): 520-529.
Yang L W,Wei Y J,Peng L,et al. Kinematical characteristics of collapse in red beds in Kangsu Town,Wuqia County,Xinjiang[J]. J Eng Geol,2020,28(3):520-529.
- [9] 王颂,张路青,周剑,等. 青藏铁路设村段崩塌特征分析与运动学模拟[J]. 工程地质学报,2020,28(4):784-792.
Wang S,Zhang L Q,Zhou J,et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall along Shexing village section of Qinghai-Tibet railway[J]. J Eng Geol,2020,28(4):784-792.
- [10] 吕艳,王根龙,张新社. 翠华山山崩地质遗迹景观离散元数值模拟[J]. 工程地质学报,2013,21(3):443-449.
Lü Y,Wang G L,Zhang X S. Numerical simulation of Cuihua rock avalanche with discrete element method[J]. J Eng Geol,2013,21(3):443-449.
- [11] 石崇,王盛年,刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2798-2805.
Shi C,Wang S N,Liu L. Research of avalanche disaster numerical simulation based on granular discrete element method of high-steep slope under seismic loads[J]. Chin J Rock Mech Eng,2013,32(S1):2798-2805.
- [12] 申通,王运生,张云辉. 皂角沱崩塌形成机制数值模拟[J]. 山地学报,2016,34(4):442-450.
Shen T,Wang Y S,Zhang Y H. Numerical simulation of formation mechanism of the Zaojiaotuo collapse[J]. Mt Res,2016,34(4):442-450.
- [13] 刘传正,葛永刚,江兴元,等. 鲁甸地震红石岩崩塌触发机理分析[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(4):601-608.
Liu C Z,Ge Y G,Jiang X Y,et al. Dynamic analysis the Hongshiyuan collapse triggered by Ludian Earthquake[J]. J Dis Prevent Mitigat Eng,2016,36(4):601-608.
- [14] 刘刚,燕云鹏,刘建宇. 青藏高原西部地质灾害分布特征及背景分析[J]. 中国地质调查,2017,4(3):37-45.
Liu G,Yan Y P,Liu J Y. Analysis of distribution character and background of geological hazards in western Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geol Surv China,2017,4(3):37-45.
- [15] 纳曼·麦麦提,张鹏,李俊才. 基于离散元地震作用下块状危岩群体崩塌前兆特征研究[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2017,39(2):97-101.
Muhammat N,Zhang P,Li J C. Seismic group collapse precursory characteristics of the blocky perilous rocks based on discrete element[J]. J Nanjing Tech Univ:Nat Sci Ed,2017,39(2):97-101.
- [16] 高相波,李丽慧,廖小辉,等. 基于逆向工程建模方法的危岩体稳定性数值模拟分析[J]. 工程地质学报,2020,28(3): 557-564.
Gao X B,Li L H,Liao X H,et al. Numerical simulation analysis of stability of unstable rock mass with reverse engineering modeling method[J]. J Eng Geol,2020,28(3):557-564.
- [17] 杨庆华,姚令侃,任自铭,等. 地震作用下松散体斜坡崩塌动力学特性离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):368-374.
Yang Q H,Yao L K,Ren Z M,et al. Centrifugal model test on dynamical characteristics of landslips of loose slope under seismic loading[J]. Chin J Rock Mech Eng,2008,27(2):368-374.
- [18] 戴屹立,李俊才,张鹏,等. 陡崖块状危岩崩塌破坏时间的地震模型试验[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2019,

41(2):201–205.

Dai Y L,Li J C,Zhang P,et al. Earthquake model test on collapse time of cliff massive dangerous rock[J]. J Nanjing Tech Univ;Nat Sci Ed,2019,41(2):201–205.

[19] 宋波,李吉人,郝晓敏,等. 边坡崩塌落石运动距离振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(S1):366–372.

Song B,Li J R,Hao X M,et al. Shaking table test on distance of slope rockfalls collapse[J]. J Build Struct,2016,37(S1):366–372.

[20] 陈宙翔,叶咸,张文波,等. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价[J]. 地震工程学报,2019,41(1):257–267,270.

Chen Z X,Ye X,Zhang W B,et al. Formation mechanism analysis and stability evaluation of dangerous rock collapses based on the oblique photography by unmanned aerial vehicles [J]. China Earthq Eng J,2019,41(1):257–267,270.

[21] 梁京涛,铁永波,赵聪,等. 基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究[J]. 中国地质调查,2020,7(5):107–113.

Liang J T,Tie Y B,Zhao C,et al. Technology and method research on the early detection of high – level collapse based on the nap – of – the – object photography[J]. Geol Surv China,2020,7(5):107–113.

[22] Ciantia M O,Arroyo M,Calvetti F,et al. An approach to enhance efficiency of DEM modelling of soils with crushable grains[J]. Géotechnique,2015,65(2):91–110.

Movement characteristics of rockfall under earthquake
in Guoda Mountain of Kangding City

XU Wei^{1,2}, ZHU Zhiming³, TIE Yongbo¹, YUAN Chuanbao⁴

(1. China Geological Survey of Chengdu Center, Sichuan Chengdu 610081, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 3. Wuhan Institute of Geological Engineering Exploration Co. , Ltd, Hubei Wuhan 430050, China; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: The landforms in Kangding City are deep – cutting valley, with steep slopes and exposed bedrocks, and the falling rocks and earthquakes occurred frequently in this area. In order to carry out the study on the characteristics and laws of the collapse movement under the earthquake action, the researchers in this paper take rockfalls in Guoda Mountain of Kanding City as a case study and adopt the Particle Flow Code software PFC^{2D} to simulate the movement characteristics and failure process rockfall at different locations (boulder stone on the top of slope, catallactic rock mass on the slope, collapse accumulation in the middle of slope, block rockfall under the slope) under Ms 8.0 earthquake. The results are as following: ① The boulder stones on the top of slope with small mass are easy to be started, and the boulder stones with nearly spherical shape are easy to be capsized and rolled. The movement types after departing along the free face are falling, colliding and rolling, with the highest rate of 11.8 m/s. ② The failure process of catallactic rock mass on the slope can be divided into four stages, including extending – penetrating of fracture, starting – falling, crashing – disintegrating, and rolling – stacking. The block rock mass above the catallactic rock mass moves furthest, up to 269 m. ③ The collapse accumulation forms a debris flow from front to back, and its movement types along the slope are rolling and colliding. ④ The movement characteristics of fallrocks in the lower part of the mountain are starting, sliding, squeezing, disintegrating, re – sliding, re – squeezing and accumulating. ⑤ The collision, friction, extrusion and disintegration occurred in the collapses in different locations during movement, which quickly consumed their own kinetic energy and caused sharply dropping in distance and speed. The discrete element simulations could help refined understanding of collapse in deep – cutting valleys, which provides some scientific basis for the project management of collapse and disaster prevention in mountainous regions and cities.

Keywords: Kangding City; rockfall belt of Guoda Mountain; movement characteristics

(责任编辑: 常艳)