

文章编号: 1008-2786-(2016)4-442-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000149

# 皂角沱崩塌形成机制数值模拟

申 通,王运生,张云辉

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室/成都理工大学,四川 成都 610059)

**摘 要:** 以位于“5·12”汶川大地震震中区的皂角沱崩塌为研究对象,通过对崩塌所处的自然地理、工程地质环境进行野外调查,分析崩塌的发育特征;采用不连续变形分析软件 DDA 对坡体失稳崩塌的全过程进行模拟研究。结果表明,斜坡地形放大效应在震中区是客观存在的,具倾向坡外的陡倾控制性结构面的高陡突出地形对地震波具有明显的放大作用。该坡体崩塌失稳模式为:峰值加速度放大→增加的振幅迫使岩体沿陡倾坡外的控制性结构面迅速拉裂→沿滑动面发生崩滑→高速脱离滑源区→巨大的势能和动能驱动块体做长距离运动。通过数值模拟可知,随着斜坡坡高的增大,地震加速度和速度无论是在水平向,还是在竖向向均存在放大效应,但是水平向的放大效应较竖向向更明显;结构面监测点的加速度和速度放大系数相比稳定的坡体要大得多。地震袭来,当遇到陡倾坡外的不连续结构面时,斜坡动力响应强烈,最终危岩体沿控制性结构面发生崩滑破坏。

**关键词:** 皂角沱崩塌;陡倾顺层岩质斜坡;形成机制分析;不连续变形分析(DDA)

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

2008 年四川发生了“5·12”汶川大地震,震级达到 8.0 级。汶川地震地质灾害的研究成果表明,在诸多地震诱发的地质灾害中以崩塌数量最多。许多学者对该地区地震触发的崩塌、滑坡开展了大量研究工作。黄润秋<sup>[1-2]</sup>在大量现场调查资料基础上,提出了一套描述这场特大地震触发崩滑和成因机制的分类体系和相应的“术语”,初步揭示了汶川大地震触发地质灾害的成因机制、地质模式和动力特征;王运生<sup>[3-4]</sup>等对汶川地震崩塌、滑坡的发育特征及其控制因素进行了较为深入地研究;许强<sup>[5-6]</sup>通过对汶川地震区地质灾害进行大量现场调查,并结合室内分析模拟,对地震诱发的滑坡、崩塌、不稳定斜坡(震裂山体)等次生地质灾害的类型及特征进行了较系统地研究;冯文凯<sup>[7-8]</sup>等结合汶川地震造成的斜坡震裂变形破坏现象,通过有限元与相似材料模型研究了地震滑坡在振动条件下的破坏失稳机制。

皂角沱崩塌位于四川省汶川县银杏乡,形成于“5·12”地震时,是极震区内典型的岩质斜坡在地

震触发下崩落失稳的。通过对该崩塌所处的自然地理、工程地质环境进行野外调查,分析崩塌的发育特征;并运用相关理论和数值模型模拟,研究斜坡在地震动力荷载作用下的动力响应过程,通过定性 & 定量的分析,揭示强震条件下该崩塌的形成机制,对于震中区崩塌的认识及防治具有重要意义。

## 1 基本特征

该崩塌发育在岷江左岸的皂角沱。地震袭来时,坡体失稳破坏,大量块石瞬间崩落而下,将 G317 国道阻断,崩积物堆积于斜坡和岷江沟道内<sup>[9]</sup>。“5·12”地震中,山顶处跨塌形成坡度为 43°~67°的圈椅状崩塌带,崩塌物源区分布高程为 1 780 ~ 1 890 m,属高位崩塌。崩塌体整体呈陡-缓-陡-缓变化,堆积体前沿进入岷江河道内。

皂角沱崩塌主崩方向 260°,堆积体平面呈舌形。堆积体坡脚高程 1 150 m,坡顶高程 1 520 m,堆积体斜长约 400 m,前沿最大宽度为 100 m,堆积体

收稿日期(Received date): 2015-09-05;修回日期(Accepted): 2015-10-19。

作者简介(Biography): 申通(1988-),男,河南省平顶山市人,博士研究生,从事地质工程专业研究。[Shen Tong(1988-),male,born in Pingding Shan people,Henan province,Ph.D Candidate,Engaged in Geological Engineering.] E-mail: 2276522564@qq.com



图 1 崩塌堆积体全景

Fig.1 Landform and physiognomy of the collapse site

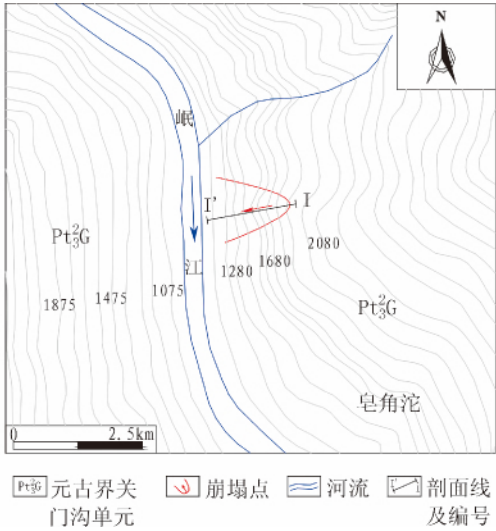


图 2 崩塌点工程地质平面图

Fig.2 Engineering geological plane of the Zaojiaotuo collapse

面积约为  $1.4 \times 10^4 \text{ m}^2$  ,堆积体厚度 10 m ,堆积体体积达  $14 \times 10^4 \text{ m}^3$  ,属于大型崩塌。

岩性主要为花岗岩夹辉长岩 ,局部可见石英条带 ,基岩节理较为发育 ,根据野外调查和室内分析可知崩塌体主要受 3 组节理控制( 图 4 表 1) 。通过各组结构面的组合 ,将基岩切割为大块体 ,部分区域岩体呈破碎状。现场可见岩体崩滑后形成的崩滑壁。

2 形成机制

根据上述分析得出的 3 组控制性结构面 ,做出

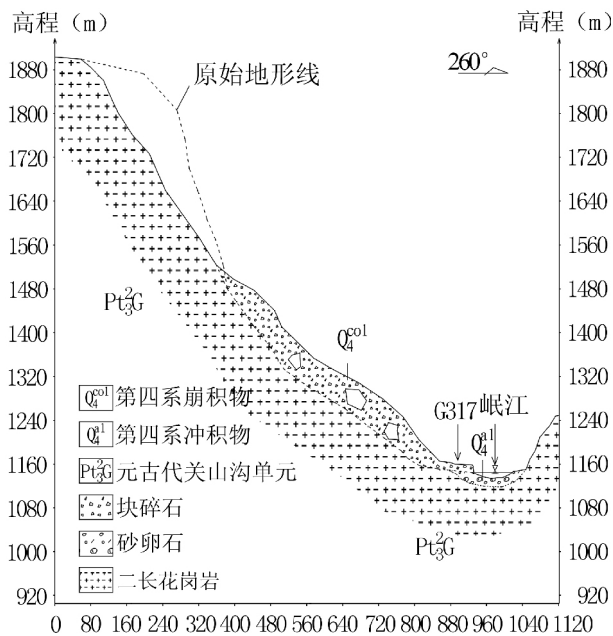


图 3 银杏乡皂角沱崩塌工程地质剖面图

Fig.3 Longitudinal profile of the Zaojiaotuo collapse



图 4 物源区基岩节理产状

Fig.4 Rock mass joint attitude in provenance

表 1 岩体发育的控制性节理统计	
Tab.1 Statistics of the controlling joints	
节理产状	具体描述
69° ∠ 85°	陡倾节理 ,节理面较平直 ,部分较粗糙 ,局部充填泥质或岩屑
264° ∠ 55°	缓倾坡外节理 ,节理呈闭合 - 张开状 ,张开度一般为 4.0 ~ 7 mm
320° ∠ 67°	节理倾向与坡向近垂直 ,且倾角较陡 ,节理面较平直 ,部分较粗糙

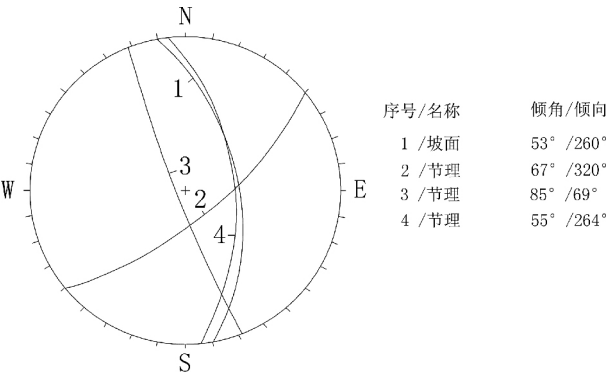


图 5 崩塌赤平投影图

Fig.5 Stereographic projection of bedding planes and joints in slope

表 2 赤平投影图中各节理组的描述统计

Tab.2 Description and statistics of each joint set in stereographic projection

节理组号	赤平投影图中各节理组的描述
1	为坡面投影
2	为节理投影,该节理组与坡向近垂直
3	为节理投影,该节理组倾向坡内,倾角很大,为陡倾节理
4	为节理投影,该节理组倾向坡外,倾角略大于坡角,为潜在危险面

赤平投影图(图 5),详细分析见表 2。

结合赤平投影图,对以上节理组进行分析,得出各节理组的耦合作用。2、4 组节理交线倾向与坡向相同,且倾角小于坡角,是最危险的一组滑面。在三组控制性节理综合作用下,岩体被切割成较规则菱形块体。2、4 组结构面控制了其两侧边界,3 组陡倾结构面控制崩塌后缘滑面边界,4 组缓倾坡外结构面控制崩塌底滑面(剪出口)边界,最终在地震作用下沿 4 组结构面交线产生滑动破坏,形成崩塌。

岷江水流湍急,强烈的下切侵蚀活动导致两岸岩体卸荷松弛,形成大量卸荷裂隙,岩体完整性遭受破坏<sup>[10]</sup>。因崩塌距震源较近,地震发生时,纵波首先到达,主要沿竖向传播,在纵波作用下卸荷裂隙进一步向下发展,岩体进一步被切割成大量块体;横波沿水平方向传播,在横波强大的水平冲击力作用下,危岩体沿控制性结构面发生崩滑破坏。通过以上综合分析可知,皂角沱崩塌的形成机制为在地震力作用下,岩体沿控制性结构面发生破坏。

3 斜坡动力响应数值模拟

DDA 法是由石根华<sup>[11-12]</sup>提出的块体系统不连

续变形分析方法(Discontinuous Deformation Analysis,简称 DDA)发展而来,是基于岩体介质非连续性发展起来的一种新的数值分析方法。通过非连续变形分析软件 DDA,能够很好地研究节理化岩质斜坡在地震动力作用下的动力响应情况。

3.1 数值模型的建立

以图 3 皂角沱崩塌工程地质剖面图作为地质原型。该崩塌岩性较为单一,主要为元古界花岗岩。通过分析建立计算模型(图 6)。该计算模型底长 1 121 m,模型左侧的高度为 998 m,右边的高度为 343 m。模型中的地质单元体分为崩塌体和基岩体这两类;模型中共计 212 个块体,1 751 个节点。

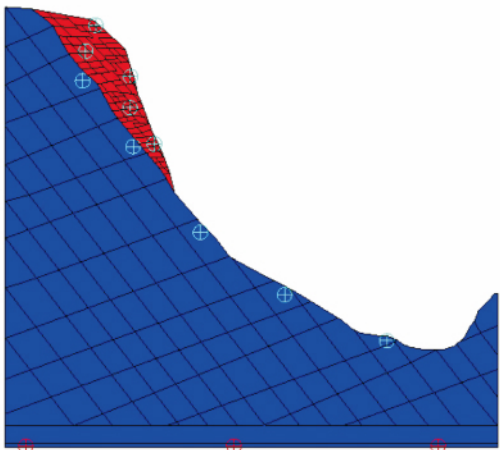


图 6 数值模型示意图

Fig.6 Numerical model of Zaojiao Tuo collapse

崩塌体岩性主要为中-强风化元古界花岗岩,夹少量辉长岩和石英条带。为简化计算,崩塌体岩性作为强风化岩,崩床岩体岩性作为弱风化岩,结构面为几组主要节理面。岩体材料和岩土体物理力学参数<sup>[13]</sup>见表 3、4。

表 3 模型计算方法的确定

Tab.3 Calculation method of numerical model

岩土体材料	计算过程中采用弹性模型
岩体破坏准则	破坏准则采用莫尔-库仑准则

表 4 计算模型中岩土体力学参数

Tab.4 Physico-mechanical parameters of slope rock mass

岩土分类	天然密度 / ( kg/m <sup>3</sup> )	粘结力 / MPa	内摩擦角 / °	体积模量 / MPa	剪切模量 / MPa	抗拉强度 / MPa
强风化岩	2 450	2.5	25	1 560	450	1.4
弱风化岩	2 700	6.8	41	2 560	1 560	2.5

DDA 数值模拟软件<sup>[14]</sup>在对计算模型进行动力运算时,必须要进行静力分析。数值模型的边界条件的设定情况详见表 5。

表 5 计算模型中边界条件的设定  
Tab. 5 Boundary conditions of numerical model

计算过程	边界条件的设定
静力分析	边界条件采用底部边界竖直方向约束,两侧边界水平方向约束。
动力分析	模型底部设置粘滞边界 <sup>[15]</sup> ,用来吸收施加地震动力波,两侧自由场边界为模型提供了与无限场地相同的效果,动力计算过程当中,地震波及能量通过模型两侧的自由场边界发散。

3.2 地震动荷载的选取

DDA 在计算过程中<sup>[16]</sup>允许将现场实测的地震加速度曲线作为动力荷载直接施加于计算模型的底部。这里选用距离研究区最近的地震监测站——中国地震台网卧龙站记录的汶川地震加速度曲线作为施加的荷载(图 7)。图中,地震加速度最大值产生于 13.02 s 时,其值为 9.876 m/s<sup>2</sup>,地震持续时间为 60 s。

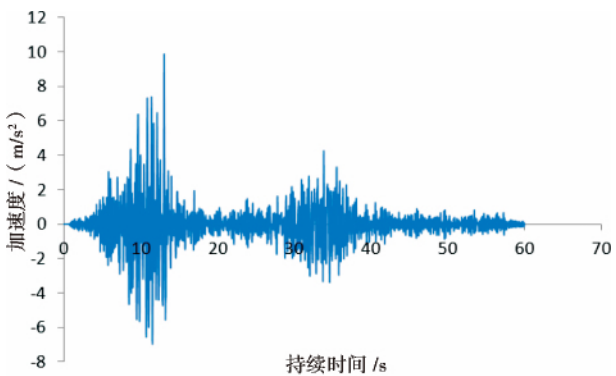


图 7 地震加速度输入曲线(卧龙站)  
Fig. 7 Time-history curves of seismic acceleration

3.3 监测点布置

为了揭示斜坡在地震波作用下的动力响应过程,在模型中设置了一些监测点(图 8),用以监测崩塌在地震作用下加速度、速度、位移随时间的变化过程。

4 数值模拟结果分析

4.1 地震波输入方法和黏滞边界条件的验证

建立如图 9 所示的边界条件验证模型,模型尺

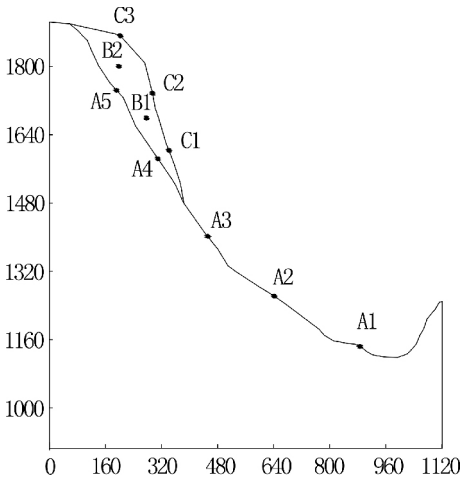


图 8 模型监测点布置示意图

Fig. 8 Distribution of monitoring points

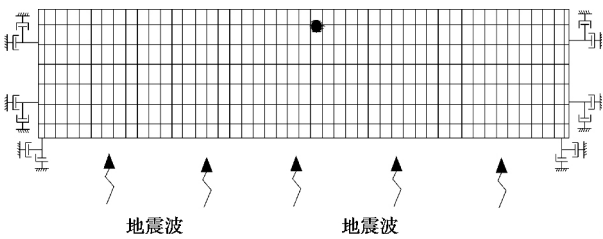
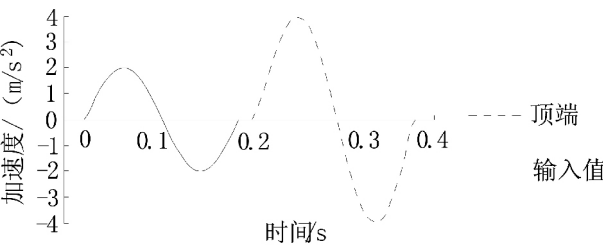
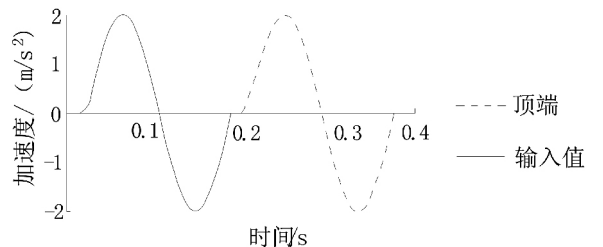


图 9 边界条件验证模型

Fig. 9 Model for validation



(a) 顶部为自由边界



(b) 顶部为黏滞边界

图 10 地震波的输入输出对比

Fig. 10 Comparison of input and output of Sine wave

寸为 1 500 m×300 m,内部采用两组虚节理切割形成块体,虚节理是为了形成块体单元。块体弹性模量为 19 GPa,泊松比为 0.25,密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>。



不考虑重力。模型两侧边界和底边界采用黏滞边界,顶边界分别施加黏滞边界及自由场边界来验算。

在模型底端施加正弦加速度波(峰值加速度为  $0.2g$ , 周期为  $0.2s$ ), 通过对比输入波和顶部输出

波(图 10) 的波形图可知边界条件设置合理。

#### 4.2 加速度、速度放大效应的研究

由斜坡体自上而下设置监测点 A1、A2、A3、A4 及 A5(监测点 A1、A2 位于结构面上, 其他 3 点位于

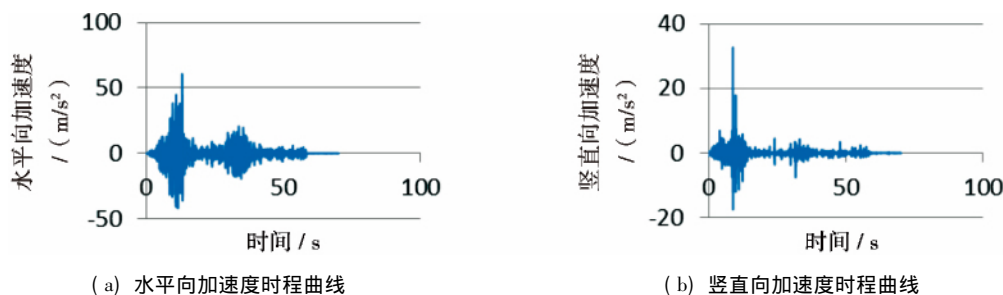


图 11 监测点 A1 加速度时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of acceleration of monitoring point A1

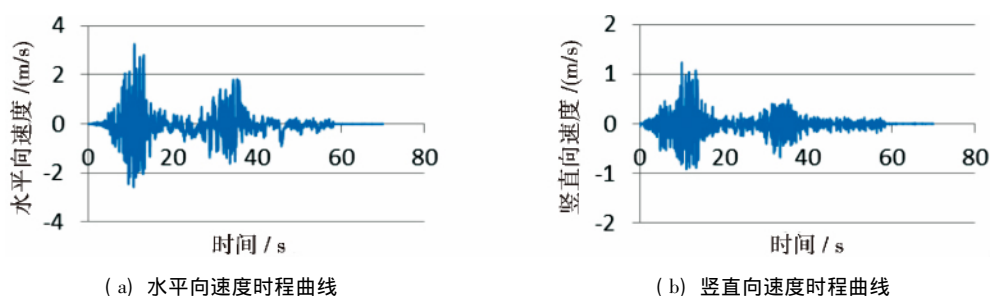


图 12 监测点 A1 速度时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of velocity of monitoring point A1

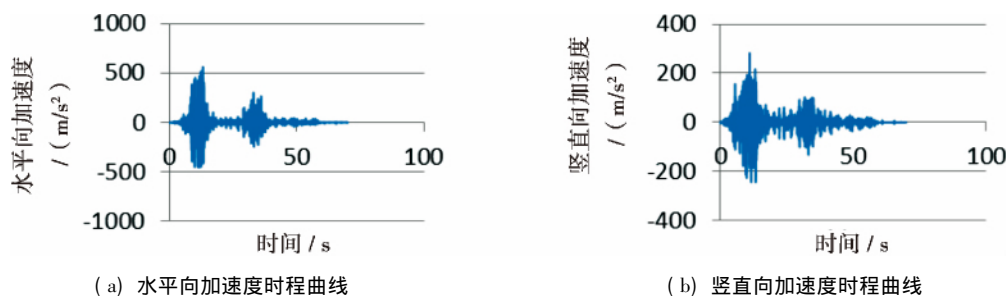


图 13 监测点 A5 加速度时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of acceleration of monitoring point A5

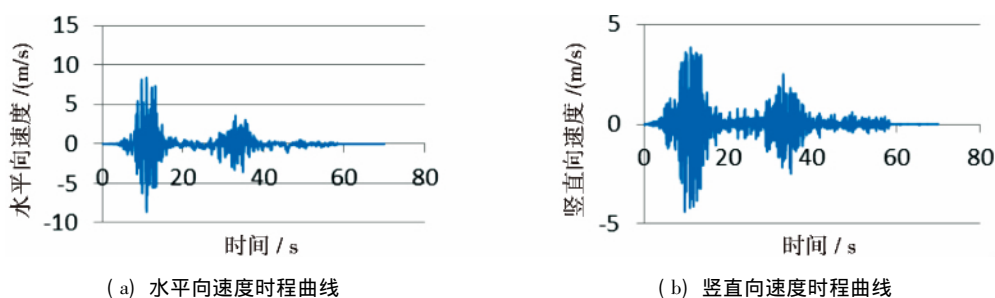


图 14 监测点 A5 速度时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of velocity of monitoring point A5

基岩上) ,通过分析在数值计算中记录各个监测点速度、加速度时程曲线,从而得出斜坡在地震作用下的动力响应规律。模拟发现,无论是速度还是加速度,随着高程的增加均存在放大效应,监测点的加速度、速度时程曲线如图 11 ~ 14 所示。对实测数据进行分析,可以得出监测点 A1 ~ A5 速度、加速度峰值如表 6 所示,并可以求得监测点 A1 ~ A5 速度、加速度放大系数如表 7 所示。

表 6 监测点 A1 ~ A5 速度、加速度峰值  
Tab. 6 Peak values of velocity and acceleration at monitoring points A1 ~ A5 / ( m/s)

监测点号	加速度峰值		速度峰值	
	水平	竖向	水平	竖向
A1	60.7	32.4	3.18	1.21
A2	-80.8	43.6	3.31	1.33
A3	-92.9	51.3	3.82	-1.65
A4	-386.4	-178.9	6.97	-3.26
A5	561.2	281.8	-8.63	-4.37

表 7 监测点 A1 ~ A5 速度、加速度放大系数  
Tab. 7 Amplification factors of velocity and acceleration at monitoring points A1 ~ A5

监测点号	加速度放大系数		速度放大系数	
	水平	竖向	水平	竖向
A1	6.15	4.91	2.45	1.37
A2	8.18	6.60	2.55	1.51
A3	9.41	7.77	2.94	1.88
A4	39.13	27.10	5.36	3.70
A5	56.82	42.68	6.64	4.97

从图表中可知,随着斜坡坡高的增大,地震加速度和速度无论是在水平向,还是在竖向均存在放大效应,但是和竖向相比,水平向的放大效应更加显著;通过分析可知放大效应的显著程度由大到小排列为:水平向加速度 > 竖向加速度 > 水平向速度 > 竖向速度。此外,由实测数据可以发现,监测点 A4、A5 位于结构面上,和监测点 A1 ~ A3 相比,其加速度和速度的放大系数明显提高,发生了显著跃升。

应力波进入岩体内部传播过程中,能够在在介质物性差异界面形成多向反射及折射效应,地震波的能量得到加强,产生强大的动拉应力、动剪应力作用,从而导致斜坡岩体破坏或形成独特的动力失稳

特征。研究发现<sup>[17-19]</sup>,在强震条件下,斜坡的变形破坏特征与结构面密切相关,其破坏具有累积效应且受到结构面控制,因此在动力响应分析时,结构面的加速度放大系数相比稳定的坡体要高出许多,也是监测点 A4、A5 加速度放大系数如此巨大的原因所在。从地震动响应的分析中得出,该坡体具有较大的启动加速度,也表明具倾向坡外的陡倾控制性结构面的高陡突出地形对地震波有明显的放大作用。

4.3 监测点位移时程曲线分析

为了研究地震作用下滑体的运动特征,在滑体上设置了监测点 B1、B2、C1、C2、C3(图 8)。通过比较滑体内监测点 B1、B2 和滑体表层监测点 C1、C2、C3 的位移时程曲线(图 15),可以明显的看出,C1、C2、C3 的位移时程曲线近似为波浪形,而 B1、B2 的位移时程曲线则更加平滑。究其原因,是因为地震波在岩体内发生波动震荡加速效应,地震纵波竖向向的能量得到放大,从而使滑体表层岩块发生抛射<sup>[20-21]</sup>。

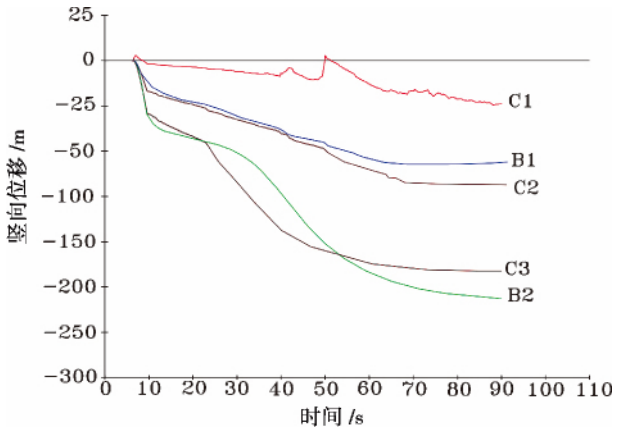


图 15 滑体中监测点的位移随时间变化曲线

Fig. 15 Time-history curves of displacement at monitoring points in landslide mass

4.4 崩塌运动过程的模拟

通过数值模拟,可以对坡体由变形失稳到崩塌运动的全过程进行分析。该崩塌体的各个时间段的运动过程如图 16 所示,详见表 8 所述。

通过以上数值分析可知,皂角沱崩塌体运动模式为:峰值加速度放大→增加的振幅迫使岩体沿陡倾坡外的控制性结构面迅速拉裂→沿滑动面发生崩滑→高速脱离滑源区→巨大的势能和动能驱动坡体做长距离运动,其间伴随着解体、块体抛射、颗粒间相互碰撞<sup>[22]</sup>、铲刮作用,具有二相甚至三相流体性

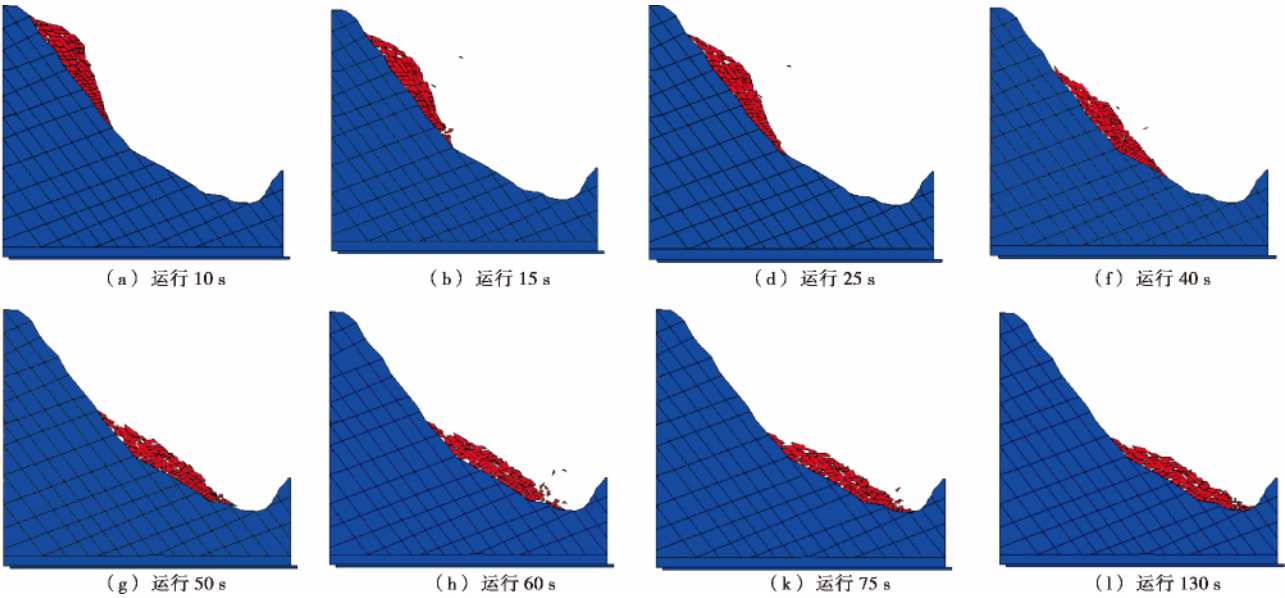


图 16 崩塌运动全过程的模拟

Fig. 16 Development process of landslide element at different running states of numerical model

表 8 崩塌体的运动过程分析

Tab. 8 Analysis of movement states

时间/s	运动过程的描述
0 ~ 10	坡脚处岩体发生明显的错动和位移,坡顶表层开始有岩块崩落,破裂面贯通形成滑动带,坡体获得了一个比较大的启动加速度,坡体沿滑动面发生大范围的错动,坡顶尤为明显,岩体后缘的崩滑壁已经明显可见
10 ~ 15	岩体继续沿滑面崩滑错动,由于岩体发生不均匀的错动在裂隙面上的剪应变累积起来,岩体后缘出现一系列顺滑面错动的拉裂缝,在地震波作用下,岩块发生振荡抛射现象
15 ~ 25	坡体向下崩滑过程中,由于坡脚附近无很好的临空条件,差异性的岩体错动受阻,因而在坡脚上部岩体发生轻微弯曲隆起变形,局部出现微弱的架空现象
25 ~ 50	坡脚处应力不断集中,最终剪断锁固段,坡体整体发生高速崩滑
50 ~ 75	坡体整体不再滑动,表层有部分岩块被震荡弹落、翻转
75 ~ 130	为滑体自稳过程;到运行 130s 时,达到稳定状态,崩滑运动结束

质。该崩塌的失稳模式为振动拉裂→震荡抛射→崩滑堆积:山高坡陡,在地震动作用下,地形放大效应显著,坡体振动拉裂、破裂解体,上部岩土体首先失稳破坏,崩塌滑落后给下部岩土体施加推力,导致滑体整体破坏。地形放大效应随坡度比的增大而增大(坡度比是指坡高与地形坡宽的比值),所以通常这

种高台陡坎坡体的山顶地震动力响应最为强烈,缓坡及山麓破坏相对不明显。

5 结论

皂角沱崩塌是岩质坡体在地震作用下破坏失稳所形成的。通过现场调查及室内数值模拟,对岩质斜坡在地震动条件下的变形破坏及运动机制进行分析,结论如下:

1) 斜坡地形放大效应在强震区是客观存在的。皂角沱崩塌不是瞬间地、均衡地失稳破坏,由于地形放大效应的影响,坡顶首先形成应力集中,随着持续的地震动输入,应力不断向中前部锁固段集中,坡体振动拉裂、破裂解体,上部岩土体崩塌滑落后给下部岩土体施加推力,导致整体破坏。

2) 随着斜坡坡高的增大,地震加速度和速度无论是在水平向,还是在竖直向均存在放大效应,但是和竖直向相比,水平向的放大效应更加显著;通过分析可知放大效应的显著程度由大到小排列为:水平向加速度>竖直向加速度>水平向速度>竖直向速度。在动力响应分析时,结构面监测点的加速度和速度放大系数相比稳定的坡体要大的多,该坡体失稳破坏时具有较大的启动加速度,也表明具陡倾坡外的控制性结构面的高陡突出地形对地震波有明显的放大作用。

3) 通过模拟研究斜坡在地震作用下的运动过

程表明崩塌失稳模式为:峰值加速度放大→增加的振幅迫使岩体沿陡倾坡外的控制性结构面迅速拉裂→沿滑动面发生崩滑→高速脱离滑源区→巨大的势能和动能驱动坡地做长距离运动。

## 参考文献(References)

- [1] 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]
- [2] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585–2592 [Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan Earthquake on 12th May 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, 27(12): 2585–2592]
- [3] 王运生, 罗永红, 吉峰, 等. 汶川大地震山地灾害发育的控制因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 759–763 [Wang Yunsheng, Luo Yonghong, Ji Feng, et al. Analysis of the controlling factors on geo-hazards in mountainous epicenter zones of the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology 2008, 16(6): 759–763]
- [4] 罗永红, 王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. 山地学报, 2013, 31(2): 200–210 [Luo Yonghong, Wang Yunsheng. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan Earthquake [J]. Mountain Research, 2013, 31(2): 200–210]
- [5] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2): 86–93 [Xu Qiang. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation 2009, 20(2): 86–93]
- [6] 许强, 裴向军, 黄润秋. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Xu Qiang, Pei Xiangjun, Huang Runqiu. Large scale landslides induced by the Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science Press 2009.]
- [7] 冯文凯, 许强, 黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3124–3130 [Feng Wenkai, Xu Qiang, Huang Runqiu. Preliminary study on mechanical mechanism of slope earthquake-induced deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Suppl. 1): 3124–3130]
- [8] 杜杰, 冯文凯, 石豫川, 等. 汶川地震对望月寨滑坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 856–862 [Du Jie, Feng Wenkai, Shi Yuchuan, et al. Research on impact of Wenchuan earthquake on stability of Wangyuezhai landslide [J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(3): 856–862]
- [9] 钱奎. 皂角沱崩塌成因分析及防治措施研究[J]. 城市建设理论, 2013, 11(2): 18–22 [Qian Kui. Formation mechanism analysis and prevention measures of Zaojiao Tuo collapse [J]. Cheng-
- Shi Jianshe, Li Lun, Yan Jiu 2013, 11(2): 18–22]
- [10] 王运生, 罗永红, 吴俊峰, 等. 中国西部深切河谷谷底卸荷松弛带成因机理研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 463–468 [Wang Yunsheng, Luo Yonghong, Wu Junfeng, et al. Study on the genetic mechanism of unloaded and relaxed zone in the deep river valley bottom, west of China [J]. Advances in Earth science, 2008, 23(5): 463–468]
- [11] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. [Shi Genhua. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.]
- [12] 姜清辉, 周创兵. 岩土工程不连续变形分析计算中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2014–2026 [Jiang Qinghui, Zhou Chuangbing. Some issues in discontinuous deformation analysis for geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007, 26(10): 2014–2026]
- [13] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319–327 [Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Yin Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of P and S seismic waves — taking Tangjiashan landslide in Beichuan County for example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010, 29(2): 319–327]
- [14] Lysmer J. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, 95(4): 759–877
- [15] 郭爱清, 任放. 块体系统不连续变形分析理论的初步开发和应用[J]. 人民长江, 1993, 24(5): 45–49 [Wu Aiqing, Ren Fang. Preliminary development and application of discontinuous deformation analysis theory to block system [J]. Yangtze River, 1993, 24(5): 45–49]
- [16] 付晓东, 盛谦, 张勇慧, 等. DDA方法在波动问题计算中的初步研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(2): 70–75 [Fu Xiaodong, Sheng Qian, Zhang Yonghui, et al. Preliminary research on wave problem calculation using DDA method [J]. Journal of Sichuan University (Engineering science edition) 2012, 44(2): 70–75]
- [17] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319–327 [Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Yin Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of p and s seismic waves—taking Tangjiashan landslide in Beichuan county for example [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010, 29(2): 319–327]
- [18] 申通, 王运生, 吴龙科. 重庆小南海滑坡形成机制离散元模拟分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增2): 667–675 [Shen Tong, Wang Yunsheng, Wu Longke. Discrete element simulation analysis of formation mechanism of Xiaonanhai landslide in Chongqing city [J]. Rock and Soil Mechanics 2014, 35(Suppl. 2): 667–675]
- [19] 曹琰波, 戴福初, 许冲, 等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 2878–2887



- [Cao Yanbo ,Dai Fuchu ,Xu Chong et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 ,30( Suppl. 1) : 2878 – 2887]
- [20] 许强 ,黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩塌灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报 ,2008 ,16 ( 6) : 721 – 729 [Xu Qiang , Huang Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology ,2008 ,16( 6) : 721 – 729]
- [21] 崔芳鹏 ,许强 ,谭儒蛟 ,等. 地震动力作用触发的斜坡崩滑效应模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版 ,2011 ,39( 3) : 445 – 450 [Cui Fangpeng ,Xu Qiang ,Tan Rujiao et al. Numerical simulation of collapsing and sliding response of slope triggered by seismic dynamic action [J]. Journal of Tongji University: Natural Science , 2011 ,39( 3) : 445 – 450]
- [22] Bagnold R A. The flow of cohesionless grains in fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A , 1956 ,249( 964) : 235 – 297

## Numerical Simulation of Formation Mechanism of the Zaojiaotuo Collapse

SHEN Tong ,WANG Yunsheng ,ZHANG Yunhui

( State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection/Chengdu University of Technology ,Chengdu 610059 ,China)

**Abstract:** "5.12" Wenchuan earthquake induced extensive collapse disasters in the epicentral area , which has caused huge losses to the local people's lives and property. In this paper , we choose the Zaojiaotuo collapse in the epicentral area as research object , based on detailed field investigation of the collapse's natural geography and engineering geological environment , analyses and judge the development characteristics of the collapse masses. Using the Discontinuous Deformation Analysis software ,DDA , to simulate the whole process of the landslide. The results show that , slope topography amplification effect in the epicentral area performs significantly a high and steep terrain with an inclined bedding slope controlled by steep structure plane , has a significant amplified effect on seismic wave. Amplify peak acceleration→the increasing amplitude forces rock mass along the controlling structure planes which parallel with slope to crack quickly→rock masses collapse along the slip surface→high-speed detach from the slipping source region→huge potential and kinetic energy drive rock mass to do long-distance movement. The numerical simulation analysis shows that , with the increase of slope height , particles' acceleration and velocity in the slope body has significant terrain amplification effects under the action of seismic force. However , the horizontal magnification effect is more obvious than the one of the vertical direction. The amplification factor of monitoring point's acceleration and velocity in structure plane is much greater than that in the stable slope , when seismic waves face with discontinuously steep structural surfaces which incline to the slope outside , the dynamic response of slope becomes strong and eventually lead to slope's instability.

**Key words:** Zaojiaotuo collapse; steep bedding rock slope; formation mechanism; Discontinuous Deformation Analysis( DDA)