

# 汶川地震引发高速远程滑坡 运动机理数值模拟研究

——以谢家店子滑坡为例

苏生瑞<sup>1</sup>, 张永双<sup>2</sup>, 李松<sup>1</sup>, 郝莉莉<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 梅海<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 针对汶川地震引发的谢家店子滑坡, 在现场调查分析的基础上, 建立了二维离散元数值模拟模型, 采用 2D-Block 软件对其进行了全过程的数值模拟研究, 并通过对跟踪块体的深入分析, 研究了相应地质体在不同阶段下的运动特征。模拟结果表明, 谢家店子滑坡经历了剧动启程抛掷阶段、快速撞击飞行阶段、铲刮减速碎屑流阶段及堆积掩埋阶段。为了揭示地震引发高速滑坡的发生规律, 分别研究了地震震级、斜坡地形和斜坡上岩块的尺寸对高速滑坡启动和运动过程的影响规律。地震震级对边坡的启动、变形、破坏和运动有很大的影响, 地震震级越大, 滑体启动的加速度和速度也就越大, 从而易形成高速远程滑坡。斜坡体本身的地形地貌对滑体运动也有较大影响。在震级和岩石力学参数一定的条件下, 斜坡上岩块的大小对其启动、变形和运动过程有一定影响, 随着岩块的增大, 滑体运动的每个阶段历时都在减小, 但当岩体十分破碎时, 滑体虽然能够运动, 但是很难发生抛掷。将地震滑坡的启动机理概括为积累变形效应、振荡启程效应和振荡加速效应。

**关键词:** 滑坡; 数值模拟; 运动机理; 谢家店子; 汶川地震

**中图分类号:** P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)03-0277-11

## Numerical Analysis on Motion Mechanism of Highspeed and Long Runout Landslide by Wenchuan Earthquake

——Taking Xiejiaodianzi Landslide as an Example

SU Sheng-rui<sup>1</sup>, ZHANG Yong-shuang<sup>2</sup>, LI Song<sup>1</sup>, HAO Li-li<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, MEI Hai<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** In view of Xiejiaodianzi highspeed and long runout landslide caused by Wenchuan Earthquake, based on the investigation and analysis on the spot, a two-dimension discrete element numerical simulation model was built, numerical simulation was done by 2D-Block software. Furthermore, motion characteristics of corresponding geologic body at different stages through the thorough analysis of tracking block were discussed. The results indicated that Xiejiaodianzi landslide experienced four periods: the instantaneously sliding stage, the intensive colliding cushion stage, the scraping slow down stage and the deposit stage. In order to reveal the occurrence regularity of highspeed landslide triggered by Wenchuan Earthquake, the influence laws of three factors including earthquake magnitude, the topography of landslope and the size of rockmass on the landslope to the highspeed landslide were studied. Earthquake magnitude had great influence on the set-out, deformation and destruction and movement of landslope. The greater the earthquake magnitude, the faster the accelerated speed and speed of the sliding, the easier of forming high speed and long runout landslide. The topography of slope also had greater effect on the movement of the sliding mass. Under the certain magnitude and rock mechanics

收稿日期: 2009-12-28

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010914025)

作者简介: 苏生瑞(1963-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, 从事地质工程教学和科研。E-mail: dcsusr@chd.edu.cn

parameters, the size of the rockmass on the landslide had a certain effect on the set-out, deformation and destruction and movement of landslide. With the increasing of the size of rockmass, the speed of the sliding decreased in each stage. However, when the rockmass was broken, it was hard to cast for the sliding movement although it could move. The set-out mechanisms of landslide were summarized as three effects; the progressive and deformation effect, the set-out effect and the acceleration effect.

**Key words:** landslide; numerical simulation; motion mechanism; Xiejiaodianzi; Wenchuan Earthquake

## 0 引言

地震是最为严重的自然灾害之一, 不仅直接造成人员伤亡和财产损失, 而且还可以引发其他类型的自然灾害, 尤其是山体滑坡、崩塌。2008年5月12日发生的四川汶川8.0级地震诱发的滑坡有15 000多处<sup>[1-2]</sup>, 高速远程滑坡是其中典型的一类。为了有效减小人员伤亡和经济损失, 减轻该类地震地质灾害对社会和经济的影响, 分析研究强震作用下形成的高速远程滑坡具有重大的现实意义。关于汶川地震引发的滑坡, 前人已经从断层效应<sup>[3]</sup>、发育特征<sup>[4]</sup>和运动特征<sup>[1]</sup>等方面进行了研究。谢家店子滑坡是汶川地震诱发的典型高速远程滑坡之一, 伍法权等<sup>[5]</sup>、王涛等<sup>[4]</sup>对其特征进行了描述。笔者在对位于极震区的谢家店子滑坡现场调查的基础上, 建立了数值模拟模型, 进而进行较为系统的数值模拟。首先, 采用离散单元法软件2D-Block模拟其形成和运动过程; 然后, 通过改变有关参数进行模拟试验, 得到地震震级、地形地貌、斜坡岩体结构等对高速滑坡启动和运动过程的影响规律; 最后, 通过对上述模拟结果的综合分析, 揭示地震引发高速远程滑坡的启动机理。

## 1 滑坡区地质条件

滑坡区位于四川省彭州市龙门山镇九峰村白水河右岸(图1), 海拔高度1 000~2 500 m, 地形坡度 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ , 纵剖面为上陡下缓, 中间有一山包(图2)。

滑坡形成于龙门山中央断裂带上盘, 龙门山中央断裂带走向北东向, 倾向北西向, 倾角约 $60^{\circ}$ 。断裂上盘为元古界黄水河群( $Pt_{hn}^2$ ), 岩性主要为花岗岩、辉长岩和花岗闪长岩。岩体中节理发育, 主要有两组: 一组与坡向近于平行; 另一组倾向坡内, 间距一般为10~50 cm。断裂下盘为三叠系上统须家河组( $T_3x^1$ )砂岩、泥岩和炭质页岩。汶川地震使龙门山中央断裂发生地表破裂, 以兼有右旋走滑分量的逆断层型破裂为主, 最大垂直位移6.2 m, 最

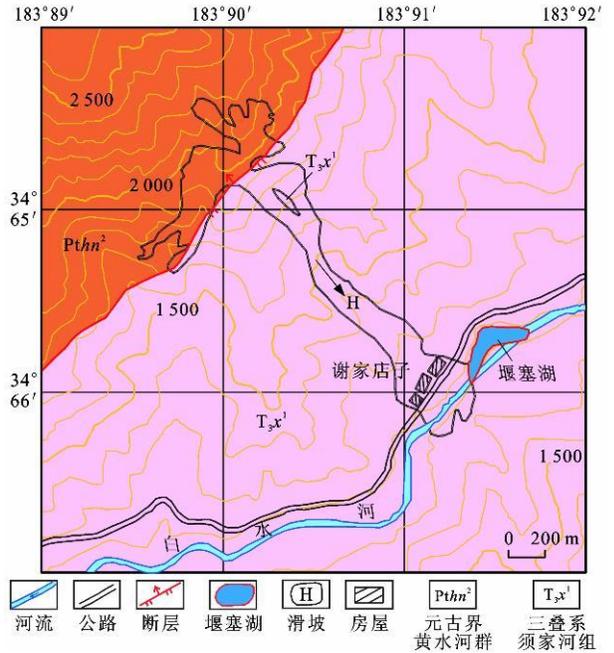


图1 谢家店子滑坡平面图

Fig. 1 Layout Map of Xiejiaodianzi Landslide

大右旋走滑位移 $4.9\text{ m}^{\text{a}}$ 。地震使龙门山中央断裂在迅速向北东向破裂的同时, 沿断裂产生了多处高速滑坡, 谢家店子滑坡即形成于龙门山断裂带上盘紧邻断裂的岩体中。

## 2 滑坡特征

谢家店子滑坡发生于2008年5月12日, 摧毁九峰村20余户房屋, 导致63人死亡。该滑坡后缘高程约2 000 m, 前缘高程约1 200 m, 长度约2 800 m, 在平面上呈长条状, 总体围限于白水河右岸的沟谷中, 总体积约为 $400 \times 10^4\text{ m}^3$ , 滑动方向 $137^{\circ}$ (图1)。由于龙门山中央断裂带从沟谷上游(沟头)斜坡通过, 在地震作用下首先产生冲击滑坡, 然后顺沟谷倾泻而下, 沿途铲刮沟谷斜坡碎屑物质, 最终在沟口谢家店子堆积(图3), 掩埋房屋造成人员伤亡并撞击白水河左岸斜坡, 散落的块石堵塞河道形成堰塞湖。构成滑坡的块石岩性主要包括断带上盘彭灌杂岩体的花岗岩、辉长岩、花岗闪长岩(图4)和断层下盘上三叠统须家河组的

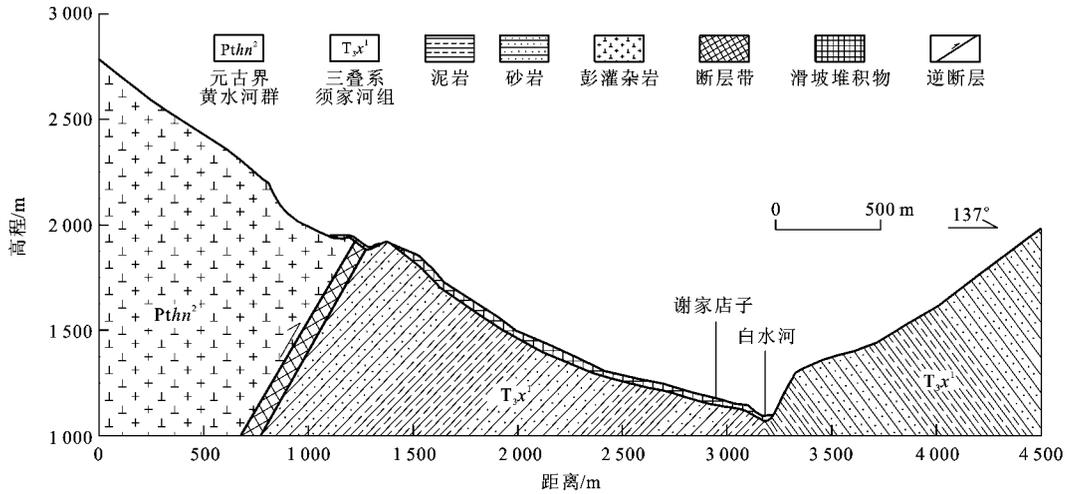


图 2 谢家店子滑坡地质剖面

Fig. 2 Geological Section Map of Xiejiaodianzi Landslide



图 3 滑坡前缘

Fig. 3 Toe of the Landslide



图 4 断层上盘的花岗岩和花岗闪长岩岩块

Fig. 4 Rock of Granite and Granodiorite in the Hanging Wall

砂岩、泥岩、炭质页岩等, 块石粒度在纵向上呈从上往下依次变小的趋势。总体上, 该滑坡大致可以分为快速崩滑段、重力加速段、快速气垫飞行一撞击段、铲刮减速碎屑流段和堆积掩埋段。滑坡后壁走向总体  $60^\circ$ , 横向上呈缓波状, 滑坡壁倾角

$40^\circ$ , 高度 150 m。

### 3 谢家店子滑坡运动过程模拟

#### 3.1 模型建立依据

模型的建立主要依据该滑坡地形图及现场调查, 结合周边地形地貌、地层岩性和地质构造特征等, 将其恢复到原始地貌形态和相应的岩体结构, 以此进行二维动态离散元数值模拟, 以再现其变形破坏过程。

#### 3.2 模型建立及参数选取

离散单元法是针对节理岩体提出的, 其单元的划分根据节理的自然切割状况确定。根据前述滑坡的基本特征和最为发育的两组结构面——层面及顺坡向节理, 然后再通过适当的简化建立离散元分析模型(图 5)。该模型底部长 4 500 m, 左侧高 1 800 m, 右侧高 1 000 m, 整个模型剖分为 695 个单元格, 滑体部分剖分为 367 个单元格(图 6)。单元格的疏密情况根据斜坡的岩体结构特征确定, 滑床以下的基岩部分作为固定单元处理, 整个计算过程中不发生位移, 运动过程中单元之间的位移增量等完全由单元的几何尺寸、质心平移和单

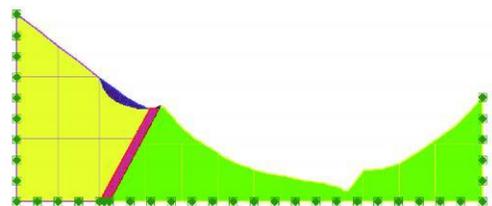


图 5 离散元分析模型

Fig. 5 Discrete Element Analysis Model

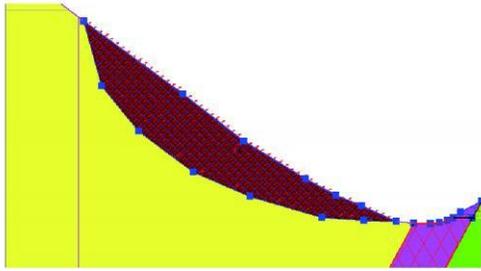


图 6 滑体单元格划分

Fig. 6 Division of Cell in the Landslide

元绕其质心转角大小来决定。在接触关系上, 选用标准塑性无张力角一边接触模型及其本构关系。有关材料的力学参数取值见表 1。需要说明的是, 计算所用的参数用一般方法很难测定, 在没有实验依据的情况下, 一般根据节理性质的工程性质类比法确定, 在计算过程中对参数进行适度范围内的调整, 以获得理想的计算成果。这样的调参过程对宏观机理的模拟是合理的, 并且离散元模型中只能设置岩土体的重度及其节理参数, 外加荷载并不能直接考虑地震的影响, 因此用等效的方法来考虑地震作用的影响。其思路是离散元模型中各块体的抗剪强度值应与实际岩石块体遭受地震作用时的抗剪强度相等, 然后把地震力的作用转化为内摩擦角的变化。而地震实际上是一个交变力系, 但在实际应用中一般都简化为一个等效静力作用, 因此, 模型中也采用规范中常用的地震作用处理方式, 将地震作用采用一个地震作用系数转化为静力来考虑<sup>[7]</sup>。

为了真实全面地模拟谢家店子滑坡运动全过程, 在计算模型取值方面, 除按表 1 的参数赋值外, 在斜坡启动运动的初始瞬间对所有变形体单元赋予水平( $X$ )方向初始速度 72 m/s, 加速度 8.82 m/s<sup>2</sup>, 竖直( $Y$ )方向初始速度 15 m/s, 加速度 -9.8 m/s<sup>2</sup>。模型底部和侧向施加水平和竖直方向约束。水平和竖直向的初始速度( $V$ )采用毛彦龙等<sup>[8]</sup>的公式

$$V = \frac{\sqrt{T_d}}{\sqrt{\pi} \omega} a_c \left[ \sqrt{\frac{a_{m \max}^2}{a_c^2} - 1} + \arcsin \frac{a_c}{a_{m \max}} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (1)$$

式中:  $T_d$  为地震动持时;  $\omega$  为振动圆频率;  $a_{m \max}$  为地面最大加速度;  $a_c$  为临界加速度。地面最大加速度数据来源于卧龙地震台采集的地震波数据的最大值, 后又经过模拟修正。抛射方向则根据谢家店子滑坡实际运动情况来确定。强震区竖向力的作用是通过竖向赋予的初速度来得到实现。

表 1 材料的力学参数

Tab. 1 Mechanical Parameters of the Materials

参数	地质体			
	黄水河组	须家河组	滑坡体	断层
接触法向刚度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	2.8 × 10 <sup>9</sup>	1.5 × 10 <sup>9</sup>	2.0 × 10 <sup>3</sup>	1.5 × 10 <sup>6</sup>
接触切向刚度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	1 × 10 <sup>9</sup>	5 × 10 <sup>8</sup>	2 × 10 <sup>2</sup>	5.0 × 10 <sup>5</sup>
接触摩擦角/ (°)	55	45	10	30
接触内聚力/ (kN · m <sup>-2</sup> )	5 × 10 <sup>4</sup>	4 × 10 <sup>4</sup>	8	1.2 × 10 <sup>3</sup>
块体密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	2 700	2 500	2 400	2 300
节理法向刚度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	1.5 × 10 <sup>9</sup>	1 × 10 <sup>9</sup>	1.6 × 10 <sup>3</sup>	5.0 × 10 <sup>4</sup>
节理切向刚度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	1 × 10 <sup>9</sup>	5 × 10 <sup>8</sup>	1.5 × 10 <sup>2</sup>	8.0 × 10 <sup>3</sup>
节理面摩擦角/ (°)	45	32	6	26
节理面内聚力/ (kN · m <sup>-2</sup> )	4 × 10 <sup>4</sup>	3 × 10 <sup>4</sup>	0	4 × 10 <sup>3</sup>

### 3.3 模拟结果分析

根据上述模型, 对谢家店子滑坡进行了全过程的数值模拟研究, 并跟踪了 196、242、487 号块体, 以其为代表来反映相应地质体在不同阶段下的运动特征。整个过程经历了 180 000 个单位时间, 每个单位时间约为  $5 \times 10^{-4}$  s, 故整个过程经历了 90 s, 模拟结果见图 7~10。

通过对模拟数据资料的对比和综合分析, 可将谢家店子滑坡不同运动阶段及其失稳、破坏、解体的主要运动特征概括为以下阶段:

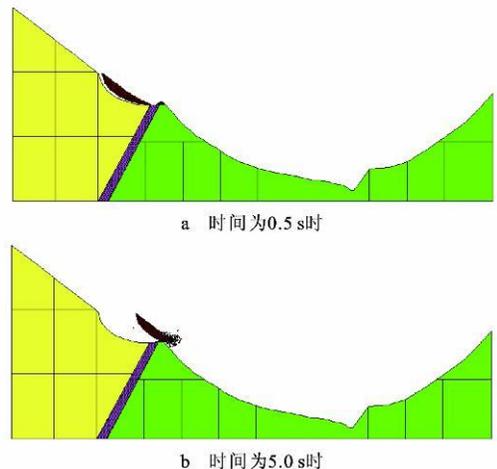


图 7 剧动启程抛掷阶段坡体运动状态

Fig. 7 Kinestate of Landslide in Instantaneously Sliding Stage

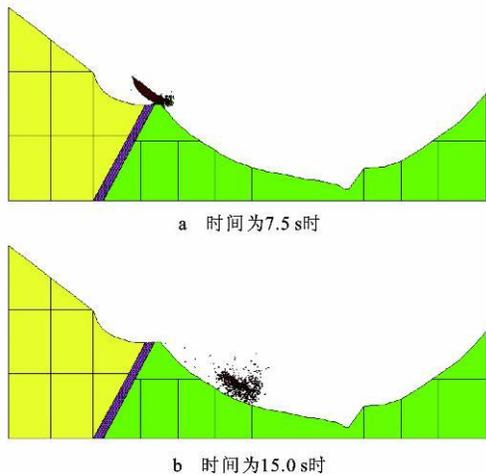


图 8 快速撞击飞行阶段坡体运动状态  
Fig. 8 Kinestate of Landslide in Intensive Colliding Cushion Stage

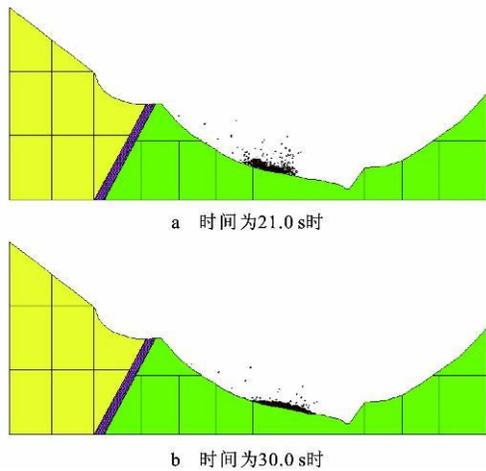


图 9 铲刮减速碎屑流阶段坡体运动状态  
Fig. 9 Kinestate of Landslide in Scraping Slow Down Stage

(1) 剧动启程抛掷阶段(0 ~ 1.5 s): 在地震力及滑体重力的作用下, 滑体沿着中后部的软弱面产生蠕动, 使应力不断在中前部的锁固段集中, 引起锁固段的渐近破坏, 使锁固段长度不断缩短, 直到贯通破坏。在地震产生的坡体波动振荡加速效应及滑床面锁固段变形体中所储存的弹性应变能的释放而产生的加速效应共同作用下, 使滑体获得一个比较大的启程剧动速度, 并且由于势动能转化的加速效应, 使滑速不断增大, 整个滑体被抛掷而出。根据牛顿第二定律可以得出, 抛掷力约为  $6.0 \times 10^7$  kN。至整个斜坡腾空而下时, 其运动速度已达 82.74 m/s。在断层段附近, 可见断层发生明显的挤压错位, 并且在滑坡后壁可见拉张裂缝, 这是因

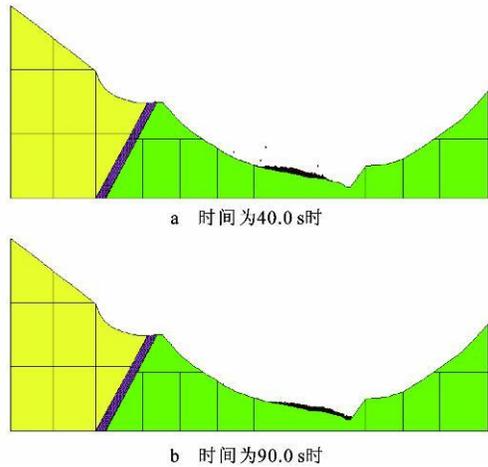


图 10 堆积掩埋夯实阶段坡体运动状态  
Fig. 10 Kinestate of Landslide in Deposit Stage

为在极震区, 首先到达的压缩波形成的强大竖向作用力, 使山体震裂松动乃至溃屈, 并在山体浅表层产生竖向裂缝, 并且这些裂缝为地震诱发次生地质灾害提供了基础。当剪切波到达后, 已被震裂松动的山体在强大的地震水平作用力下产生大量的崩塌、滑坡, 且崩滑体的后壁一般沿已有的竖向裂缝产生。

(2) 快速撞击飞行阶段(1.5 ~ 15.0 s): 被抛掷出来的整个滑体在飞行约 180 m 后, 在自重作用下向下运动, 并与对面的山包发生强烈碰撞, 致使整个山包发生解体, 形成所谓的“爆炸”现象。由于强烈碰撞, 滑体开始逐渐发生解体, 滑体的解体方式主要有滑体前后不同部分运动速度的差异性导致解体和相邻块体间复杂的相对差异运动 2 种形式。由于惯性和空气的擎托持速效应, 整个滑体形成高速抛出的碎屑流, 这些碎屑物质在空中甚至产生“涡旋”运动, 形成飞轮式的“碎屑流环”, 由此可见这种运动方式对山包的撞击破坏能力很大。

(3) 铲刮减速碎屑流阶段(15 ~ 40 s): 整个滑体解体形成的碎屑流在空中飞行 13 s 后, 由于重力作用, 以势不可挡之势向斜坡冲下, 尽管须家河组砂岩相对坚硬, 但由于岩体节理发育、风化较严重, 在猛烈撞击下发生溃决, 在碰撞的斜坡处形成明显的气浪冲击和碎屑流翻越的痕迹。在不断铲刮和碎屑物质相互碰撞过程中, 整个碎屑流速度不断减小。

(4) 堆积掩埋夯实阶段(40 ~ 90 s): 碎屑物质不断减速, 使得此阶段持续时间较长, 碎屑流在出山口形成堆积, 堆积体一脉迁就地势呈南东向脊状形

态在山前堆积;另一脉从出沟口直冲入谢家店子居民区,掩埋了村庄,堵塞了山前公路,并与白水河左岸山坡发生碰撞,形成堰塞湖。从滑体开始运动到掩埋谢家店子村庄也不过历时 45 s。

为了更好地模拟谢家店子滑坡,选择了 3 个具有代表性的 196、242、487 号块体,其中 196 号块体代表断层在整个过程的受力和位移情况,242 号块体代表山包在整个过程的运动情况、487 号块体代表滑体在整个过程的运动情况,它们的运动轨迹如图 11。

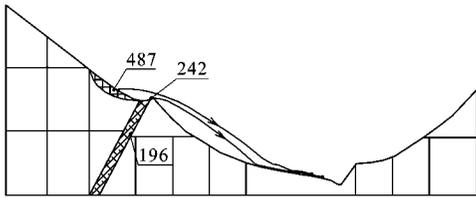


图 11 跟踪块体的运动轨迹

Fig. 11 Traces of Tracked Rockmass

从断层在 X、Y 方向(X 为正值表示向右;Y 为正值表示向上)的位移和受力曲线图(图 12、13)可以看出:

(1)断层上盘总体向上运动, X 方向向右最大位移为 0.709 m, Y 方向向上最大位移为 0.195 m,这与断层本身的性质(逆断层)是相吻合的。

(2)断层带的受力大小和方向随着时间的变化不断改变,说明在地震过程中,断层带受到明显挤压,断层突然错动产生的冲击力在 X 方向约为  $1.75 \times 10^6$  N, Y 方向约为  $-1.22 \times 10^6$  N,并在第 2.5 s 达到最大值, X 方向冲击力为  $-9.29 \times 10^6$  N, Y 方向冲击力为  $2.02 \times 10^6$  N。随后断层带受力相对稳定,基本在 x 轴附近上下波动。

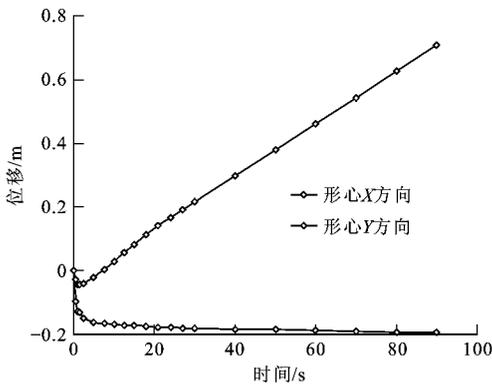


图 12 断层 X 和 Y 方向位移曲线

Fig. 12 Displacement Curve of the Fault in X and Y Directions

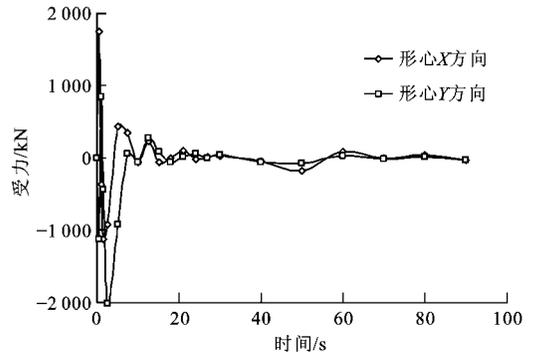


图 13 断层 X 和 Y 方向受力曲线

Fig. 13 Force Curve of the Fault in X and Y Directions

从山包和滑体运动全过程 X 和 Y 方向上的位移和速度曲线图(图 14~17)上可以分析得出:

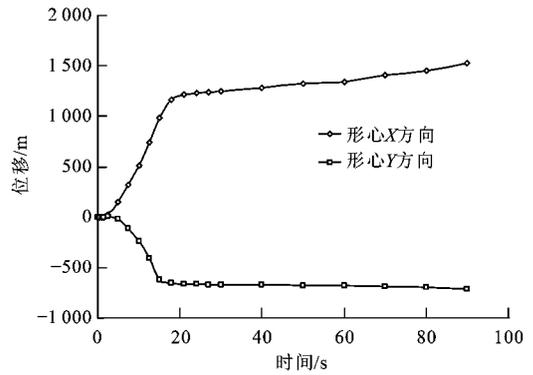


图 14 山包 X 和 Y 方向位移曲线

Fig. 14 Displacement Curve of the Hill in X and Y Directions

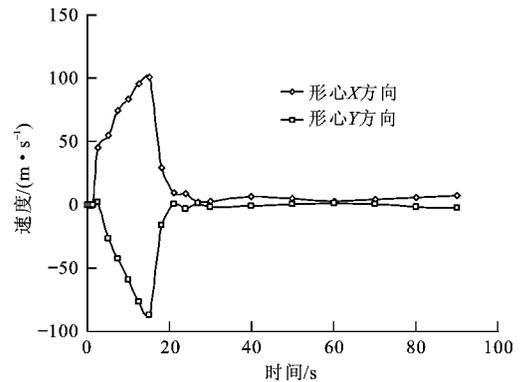


图 15 山包 X 和 Y 方向速度曲线

Fig. 15 Velocity Curve of the Hill in X and Y Directions

(1)滑体在脱离滑床被抛掷高度达 10.96 m 后开始下落,并在第 1.5 s 滑体与山包发生碰撞,撞击时间持续了 1 s,使山包迅速获得一个较大的加速度,而滑体由于碰撞减速效应速度有所降低,

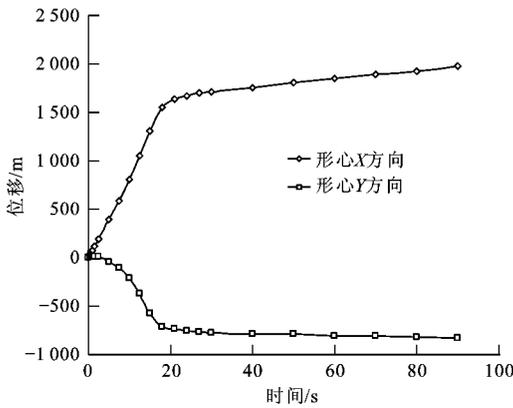


图 16 滑体 X 和 Y 方向位移曲线

Fig. 16 Displacement Curve of the Sliding Mass in X and Y Directions

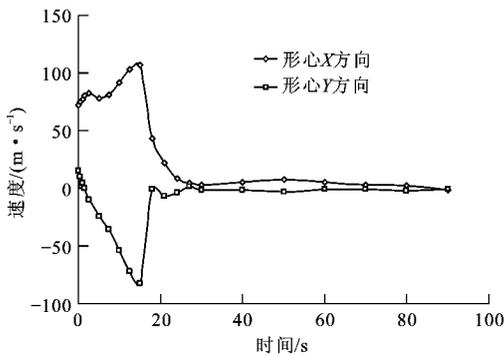


图 17 滑体 X 和 Y 方向速度曲线

Fig. 17 Velocity Curve of the Sliding Mass in X and Y Directions

最大撞击力在 X 方向达  $4.89 \times 10^6$  N, Y 方向达  $3.0 \times 10^6$  N。

(2) 从第 2.5 s 起, 解体的山包和滑体加速斜向下飞行, 在第 15 s 时, 速度达到最大, 山包 X 方向最大速度约为 101.06 m/s, Y 方向最大速度约为 -88.83 m/s, 而滑体 X 方向最大速度约为 106.96 m/s, Y 方向最大速度约为 -82.74 m/s。随后解体的山包和滑体形成的碎屑流进入铲刮减速阶段, 在掩埋谢家店子村时, 速度已降至 9.12 m/s。

(3) 碰撞解体山包 X 方向最大位移距离为  $1.53 \times 10^3$  m, Y 方向为  $-7.13 \times 10^2$  m, 而滑体 X 方向为  $1.97 \times 10^3$  m, Y 方向为  $-8.28 \times 10^2$  m。

## 4 影响滑坡的因素模拟分析

### 4.1 不同震级下滑坡对比模拟

前人研究表明, 强烈地震诱发滑坡和崩塌的数量与地震本身的震级有很大关系。一般来说, 一次地震引发的滑坡数量会随着震级的增大而增大, 所

以震级对地震滑坡有着较大影响<sup>[9]</sup>。

另外, 根据式(1), 坡体波动振荡所形成的启程剧发速度的大小, 一方面与地震动持时成正比关系, 另一方面又与振动圆频率成反比关系, 即一次地震, 其振动时间越长, 振动圆频率越低(周期越长), 则所产生的启程剧发速度也就越大; 坡体波动振荡所形成的启程剧发速度的大小与地面最大水平加速度成正比关系, 地面最大水平加速度越大, 启程剧发速度也就越高, 越易引起大型高速远程滑坡。所以, 很有必要进行不同震级下的对比模拟。

对于谢家店子滑坡, 上述模拟的是其在 8 级地震作用下的运动情况。这里以谢家店子滑坡的地质模型为模拟对象, 模拟分析其在 7 级和 6 级地震作用下的变形、破坏和运动情况, 从而通过对比研究能更清楚地了解到不同震级对边坡变形、破坏的影响, 更全面地揭示地震滑坡的启动机理。

#### 4.1.1 模型建立和参数的选取

以谢家店子滑坡为原型, 建立如图 18 的模型。

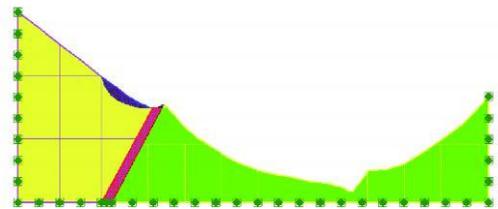


图 18 7 级地震作用下离散元模拟模型

Fig. 18 Simulation Model of Discrete Element Under the Magnitude 7 Earthquake

为了对比研究地震边坡在 7 级地震作用下的变形、破坏和运动情况, 由于没有实测的 7 级地震波, 在这里只能以经验公式<sup>[10-11]</sup>来计算 7 级地震加速度

$$\ln a = 5.832 + 1.212(1.276 + 0.749M) - 2.076 \ln(R + 25) \quad (2)$$

式中:  $a$  为地震加速度 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $M$  为地震震级;  $R$  为震中距 (km)。

通过计算可以得出, 在 7 级地震作用下地震加速度约为  $1.45 \text{ m/s}^2$ , 考虑到斜坡上松散体对地震波的放大作用, 在计算模型中将其放大 3 倍, 即取  $a = 4.35 \text{ m/s}^2$ , 滑坡的启动速度仍按式(1)计算修正得来, 其他计算参数不发生改变。计算参数如表 2。

#### 4.1.2 模拟结果分析

模拟经历了 200 000 个单位时间, 每个单位时间理论上约为  $5 \times 10^{-4} \text{ s}$ , 整个过程经历了 100 s, 仍选

表 2 7 级地震作用下斜坡计算参数

Tab. 2 Mechanical Parameters of the Landslope Under the Magnitude 7 Earthquake

水平启动速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	竖直启动速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	水平加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	竖直加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )
30	8	4.35	-9.8

择 196、242、487 号块体为跟踪块体。滑体运动过程如图 19~21, 跟踪块体运动轨迹如图 22。

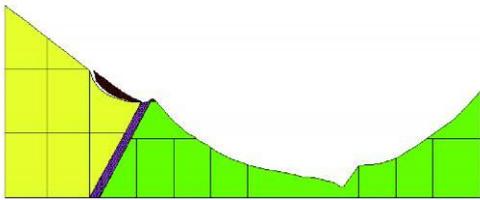


图 19 7 级地震作用下滑体的抛掷

Fig. 19 Casting of the Sliding Mass Under the Magnitude 7 Earthquake

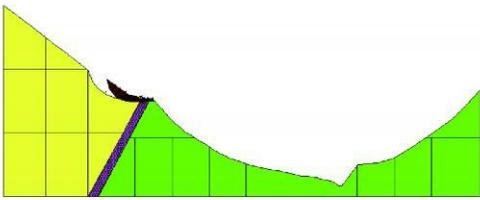


图 20 7 级地震作用下滑体与山包碰撞

Fig. 20 Collision of Sliding Mass and Hill Under the Magnitude 7 Earthquake

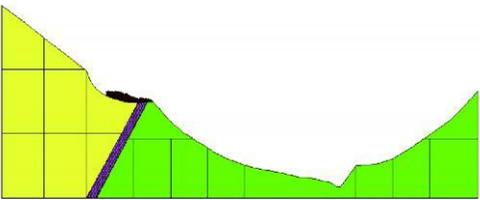


图 21 7 级地震作用下滑体最终运动结果

Fig. 21 Final Movement of the Sliding Mass Under the Magnitude 7 Earthquake

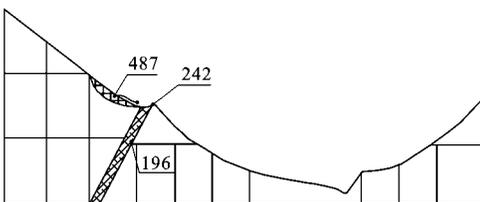


图 22 7 级地震作用下跟踪块体的运动轨迹

Fig. 22 Traces of Tracked Rockmass Under the Magnitude 7 Earthquake

从滑体运动过程图可以看出, 震级减小直接导

致滑体启动速度大大降低, 速度的降低使得滑体运动减慢, 虽然也发生抛掷, 但抛掷高度远不如 8 级地震那样, 当与前方山包发生碰撞时, 碰撞的能量也大大降低, 这也使得运动的滑体没有足够的能量使山包发生解体, 滑体与山包碰撞以后只能在山前进行堆积, 而无法冲过山包继续运动, 未能形成像 8 级地震那样的滑坡。当然, 7 级地震未能形成, 6、5 级也更不可能, 这里不再一一模拟(图 22)。

上述不同震级下滑坡对比模拟结果表明, 在谢家店子滑坡这种地形地貌条件下, 7 级地震作用下的边坡与 8 级的有明显不同。8 级地震作用下, 滑体发生抛掷, 与山包产生强烈碰撞, 形成的碎屑流以势不可挡之势冲下斜坡, 并沿途刮铲, 最终掩埋村庄, 堵塞河道, 形成堰塞湖; 而 7 级地震作用下, 由于启动速度减小, 滑体与山包发生碰撞后, 无法使山包发生解体, 只能在山前堆积, 不可能形成像 8 级地震那样的高速远程滑坡。由此可见, 地震震级对边坡的启动、变形、破坏和运动有很大影响, 地震震级越大, 滑体启动的加速度和速度也就越大, 这使得滑体在很短时间内迅速增加到一个很大的速度, 聚集较大的能量, 从而易形成高速远程滑坡。

#### 4.2 不同地形地貌下对比模拟

上述分析表明, 地震震级对边坡的启动、变形、破坏和运动有很大影响, 震级越大越易引发高速远程滑坡。但是在强震作用下, 并不是所有边坡都会发生像谢家店子那样的高速远程滑坡, 所以除地震震级外, 边坡本身的地形地貌对是否形成高速远程滑坡也有较大的影响。

通过对谢家店子滑坡在 7 级地震作用下的模拟可以清楚地看到, 滑体前的山包对滑体继续向前滑动甚至抛掷影响很大, 山包的存在阻碍了滑体的继续运动, 当然, 这只是其中的一个方面。但是从中可以看出, 边坡本身的地形地貌条件对滑体的运动产生了较大影响, 为此进行不同地形地貌下对比模拟分析。

##### 4.2.1 模型建立和参数选取

为了研究边坡本身的地形地貌对滑体运动的影响, 将滑体前的山包剔除, 建立模拟模型(图 23)。需要说明的是, 从模拟的 8 级地震作用下谢家店子滑坡中可以看出, 滑体前的山包对滑体阻碍有一定的作用, 但并不明显。而在 7 级地震作用下, 滑体前的山包对滑体继续运动的阻碍显得相当明显, 所以剔除滑体前的山包地形对 7 级地震作用下的斜

坡进行模拟。计算所用参数见表2,然后通过模拟进行适当修正。

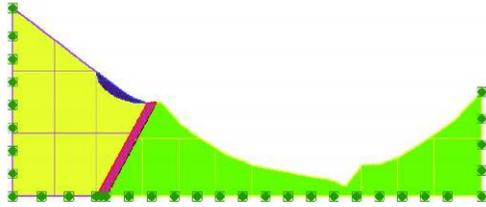


图23 7级地震作用下无山包模拟模型

Fig. 23 Simulation Model of Discrete Element Without the Hill Under the Magnitude 7 Earthquake

#### 4.2.2 模拟结果分析

本次模拟经历了300 000个单位时间,每个单位时间为 $5 \times 10^{-4}$  s,整个过程经历150 s,选择487号块体为跟踪块体。滑体的运动过程见图24~26,跟踪块体运动轨迹见图27。

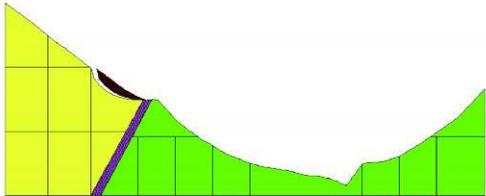


图24 不同地形地貌下滑体的抛掷

Fig. 24 Casting of the Sliding Mass Under Different Landforms

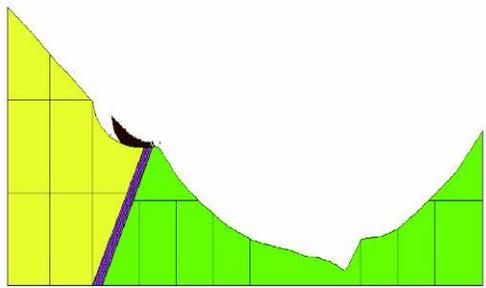


图25 不同地形地貌下滑体下落堆积

Fig. 25 Deposit State of the Sliding Mass Under Different Landforms

从模拟结果看,7级地震作用下剔除山包后,滑体虽然没有像8级地震那样抛掷、碰撞后迅速冲出剪出口形成高速远程滑坡,但是在没有山包阻碍的情况下,仍有少量解体的岩块在冲出剪出口以后,以一定速度向着下面的山坡滚动,而大部分块体在剪出口附近堆积,形成大面积的滑坡堆积物。当然,这些大面积的堆积物在强降雨或融雪等不良条件下,可能产生进一步的滑动,形成崩塌、泥石流等

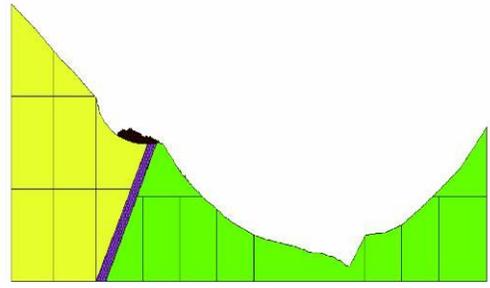


图26 不同地形地貌下滑体运动最终结果

Fig. 26 Final Movement of the Sliding Mass Under Different Landforms

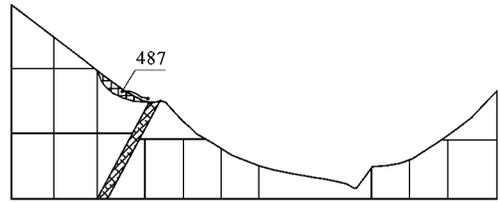


图27 不同地形地貌下跟踪块体运动轨迹

Fig. 27 Traces of Tracked Rockmass Under Different Landforms

地质灾害。

上述不同地形地貌下对比模拟结果表明,除了地震震级本身外,坡体本身的地形地貌对滑体的运动也有较大的影响。在7级地震作用下,滑体由于获得的启动速度减小,运动相对较慢,又由于无山包的阻碍,所以少量块体在冲出剪出口仍向着下面的山坡运动,但是不会形成像8级地震那样破坏性极强的高速远程滑坡。与7级地震存在山包情况下相比,没有了山包的存在,减小了山包对滑体运动的阻碍,使得解体的岩体可以继续向着山坡下继续滚动,存在安全隐患。从另一方面来讲,在地震震级相对较小的情况下,山包的存在阻碍了滑体继续向坡下运动,反而减小了地质灾害形成的可能性,起到了一定的保护作用,但是问题总是辩证的,在8级地震作用下,山包被碰撞解体后形成了更多的碎屑物质,造成的人员伤害也就大大增加。

#### 4.3 斜坡岩体不同岩块大小对比模拟

通过上述模拟得出了地震诱发的滑坡的启动、破坏、运动过程和地震震级、坡体本身地形地貌有很大的关系。但是,除此之外,斜坡岩体本身岩块的大小与其启动、破坏和运动也可能有较大的关系。这里斜坡岩体在不同岩块大小情况下进行数值模拟分析。

#### 4.3.1 模型建立和参数选取

为了模拟斜坡岩体在不同岩块大小时的启动、破坏和运动过程,将岩体剖分为不同的单元格,上文中将滑体划分为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  的单元格,这里将岩体分别剖分为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$  和  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  的单元格进行离散元模拟。

这里以谢家店子滑坡为原型,只是改变斜坡岩体岩块的大小,其他参数与 8 级地震作用下保持一致。

#### 4.3.2 模拟结果分析

为了达到模拟的统一效果,选择白水河河沟为运动的最终参考点,在  $8\text{ m} \times 8\text{ m}$  情况下,块体运动经历了 220 000 个单位时间,每个单位时间理论上约为  $5 \times 10^{-4}\text{ s}$ ,整个过程历时 110 s;在  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  情况下,块体运动经历了 180 000 个单位时间,每个单位时间理论上约为  $5 \times 10^{-4}\text{ s}$ ,整个过程历时 90 s;  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  情况下,块体运动经历了 100 000 个单位时间,每个单位时间理论上约为  $5 \times 10^{-4}\text{ s}$ ,整个过程历时 50 s。通过模拟,将它们的启动、破坏和运动过程统计为表 3、4。

表 3 不同岩体单元格剖分运动时间统计

Tab. 3 Statistics of Movement Time Under Different Dividing Rockmass

岩体单元格剖分/ (m×m)	启动启程 抛掷阶段/ s	快速撞击- 气垫飞行 阶段/s	铲刮减速 碎屑流 阶段/s	堆积掩埋 阶段/s
2×2	难以抛掷			
8×8	0~2.0	2.0~20	20~50	50~110
10×10	0~1.5	1.5~15	15~40	40~90
20×20	0~1.2	1.2~13	13~30	30~60

表 4 不同滑体单元格剖分运动速度统计

Tab. 4 Statistics of Velocity Under Different Dividing Rockmass

岩体单元格剖分/ (m×m)	启动启程抛掷 阶段平均速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	快速撞击-气垫 飞行阶段平均 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	铲刮减速碎屑 流阶段平均 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	堆积掩埋阶段 平均速度/ (m·s <sup>-1</sup> )
2×2	难以抛掷			
8×8	77.3	83.60	6.57	3.56
10×10	76.1	100.04	18.50	4.08
20×20	76.4	99.80	56.90	4.60

通过斜坡岩体不同岩块大小条件下的对比模拟发现,在岩体力学参数一定的条件下,随着岩块尺寸不断增大,滑体运动的每个阶段历时都在不断减小,表明岩体形成的碎屑流运动越快,这是因

为在总能量一定的条件下,岩块尺寸越大,其单个个体具有的能量也就越大,与对面山包发生碰撞仍能以较高的速度继续向前飞行,所以完成整个运动过程也就历时越少。当然这不是绝对的,假如斜坡岩体成为像滑床一样的完整岩体时,它在地震过程中就不会发生抛掷运动,也产生不了滑坡。但是当粒度小到一定程度时,比如模拟岩体按  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  剖分的情况下,滑体就很难发生抛掷。

综上分析得出,在震级和岩石力学参数一定的条件下,斜坡岩体本身岩块的大小对其启动、变形和运动过程有一定影响,随着岩块尺寸的增大,滑体运动的每个阶段历时也都在减小。但是这个尺寸是在一定范围之内的,当岩块尺寸大到像滑床那样一个完整的岩体时,就不会产生滑坡,当岩块尺寸小到像土体颗粒那样,滑体虽然能够运动,但是很难发生抛掷。

## 5 地震滑坡启动机理

通过对谢家店子滑坡全过程数值模拟以及改变有关参数进行的模拟试验,得到了地震震级、地形地貌和斜坡岩体结构等对高速滑坡启动和运动过程的影响规律。结合前人的研究成果,将地震滑坡的启动机理归结为积累变形效应、振荡启程效应和振荡加速效应。

### 5.1 积累变形效应

地震滑坡由于其特殊性,它不同于一般的滑坡,地震波在其中起到了很大作用。地震波波动振荡使斜坡上的岩土体变形破坏并不是一次完成的,组成斜坡的岩土体,在其内部或多或少都存在一定的不均一性,在漫长的地质时期和构造运动过程中,会形成一系列的层理、节理以及其他的构造裂隙。当地震波在地层中传播时,首先到达的压缩波和后到达剪切波会分别形成强大的竖向和水平作用力,使岩土体质点作垂直和水平振动,从而产生惯性力,这种惯性力在坡体中会产生一定的附加应力,并且会在岩土体内构造裂隙的尖端处产生应力集中现象,当由此形成的剪切力、扭转力或拉应力大于该处岩土体的抗剪强度或者抗拉强度时,就会产生局部的变形破坏,出现后缘、前缘和中部的拉裂带。当这种变形破坏不断积累,会使得这些拉裂带从上到下逐渐贯通,形成滑面,为地震滑坡的启动提供了先决条件。

## 5.2 振荡启程效应

当一个贯通的滑面形成以后,并不意味着滑体会立即产生运动,这要取决于斜坡本身的结构特征和其本身稳定性的大小。但是由于地震波的持续作用,会使得滑体沿着滑面与坡体产生不同步的震动,这也使得滑体底部的岩土体会被进一步碾碎,并使滑面变得光滑,降低了滑体的抗滑力,从而降低了坡体的稳定系数。当坡体处于或者接近临界极限平衡状态,地震波继续作用于坡体时,即地震动持时越长,在一个周期内会在滑体内部产生方向相反的两个惯性力,震级越大产生的惯性力也就越大,它们可以视为是一个外加荷载,会激发滑体的骤然启动,并出现一个较大的启程速度。由此表明,地震震级和地震动持时对地震滑坡的启动有很大影响,与模拟结果也完全吻合。

## 5.3 振荡加速效应

坡体产生骤然启动后,当地震波波动振荡方向与滑体运动方向一致时,便起到最大的作用,并与地震震级成正比,这也是振荡加速的实质,它激发滑坡体出现骤然而迅猛的启程剧动,并产生一个较大的抛掷加速度,这种加速度效应也使得由此产生的地震滑坡破坏性极强。

## 6 结语

通过离散元模拟,较为真实地再现了谢家店子滑坡在8级地震作用下变形、破坏和运动过程。通过系统的模拟研究,得出如下主要认识:

(1)谢家店子滑坡经历了剧动启程抛掷阶段、快速撞击飞行阶段、铲刮减速碎屑流阶段及堆积掩埋阶段。

(2)地震震级对边坡的启动、变形、破坏和运动有很大影响,地震震级越大,滑体启动的加速度和

速度也越大,从而易形成高速远程滑坡。

(3)斜坡体本身的地形地貌对滑体运动也有较大影响。

(4)在震级和岩石力学参数一定的条件下,斜坡上岩块的大小对其启动、变形和运动过程有一定影响,随着岩块的增大,滑体运动的每个阶段历时也都在减小。但当岩体十分破碎时,滑体虽然能够运动,但是很难发生抛掷。

(5)地震滑坡的启动机理包括积累变形效应、振荡启程效应和振荡加速效应。

### 参考文献:

- [ 1 ] 殷跃平,潘桂棠,刘宇平,等.汶川地震地质与滑坡灾害概论[M].北京:地质出版社,2009.
- [ 2 ] 彭建兵,马润勇,范文,等.汶川大震的科学思考[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):1-29.
- [ 3 ] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.
- [ 4 ] 王涛,马寅生,龙长兴,等.四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析[J].地质通报,2008,27(11):1913-1922.
- [ 5 ] 伍法权,胡瑞林,岳中琦,等.5°12汶川地震地质灾害[M].北京:地质出版社,2009.
- [ 6 ] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.汶川 $M_w$ 8.0地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,2008,30(3):597-629.
- [ 7 ] 刘红岩,王明.节理岩质边坡稳定性的离散元分析[J].金属矿山,2008(9):15-18.
- [ 8 ] 毛彦龙,胡广韬,毛新虎,等.地震滑坡启程剧动的机理研究及离散元模拟[J].工程地质学报,2001,9(1):74-80.
- [ 9 ] 陈晓兰,卢国胜.地震诱发滑坡的机理研究[J].安徽农业科学,2009,37(18):8612-8613.
- [ 10 ] Battis J. Regional Modification of Acceleration Attenuation Functions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(4): 1309-1321.
- [ 11 ] Chandra U. Attenuation of Intensities in the United States [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(6): 2003-2024.