

# 四川省溪口滑坡运动特征的离散元模拟

吴 勇

(四川联合大学水利系 成都 610065)

李自停

(机械部第二勘察设计院 成都 610066)

李勇健

(四川省地质环境监测总站 成都 610072)

**提 要** 通过离散元分析拟合了溪口滑坡碎屑流的运动过程和主要特征,认为滑坡解体后是以碎屑流方式完成运移和停积过程。

**关键词** 四川省 溪口 滑坡 离散元分析 运动过程

溪口地处华蓥山脉中段西麓,介于川东中低山和川中丘陵之间,以缓丘陵地貌为特征。受构造控制,山脉呈条带状 NNE 向延伸,地势 NE 高,SE 低,海拔 300~1 100m。

## 1 地 质 背 景

### 1.1 地层

溪口地区出露地层包括寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系和第四系。

寒武系上统洗象池组( $\epsilon_{3xx}$ ),岩层以薄—中层白云岩为主,中上部夹 2~3cm 黄褐色页岩,上部含燧石结核和黄铁矿晶体。奥陶系岩性以薄—中层灰白色灰质白云岩为主,具显晶结构,基本无溶蚀,缝合线构造发育。志留系下统龙马溪组( $S_1$ ),下部为灰色、灰黑色页岩,富含黄铁矿晶粒;上部为黄绿色、黄褐色页岩,夹 3~30cm 长铝土质、粉砂质条带。二叠系上统龙潭组( $P_2l$ ),岩性以泥岩为主,含煤层,被溪口滑坡碎屑流高速撞击的海拔 581m 山包即由此泥岩构成。三叠系须家河组( $T_{3sj}$ ),岩性自下而上共分六段,为薄层棕黄色页岩和粉砂质泥岩,含煤线或煤层,为厚层淡黄色长石石英砂岩和粉砂岩,偶夹薄层页岩,泥质粉砂岩。

### 1.2 地质构造

溪口处华蓥山复式背斜、宝顶背斜倒转翼。背斜轴向  $N25^\circ\sim30^\circ E$ ,SE 翼地层由志留系—二叠系组成,层序正常,岩层倾角  $50^\circ\sim60^\circ$ ;NE 翼为三叠系、侏罗系地层,岩层倒转,倾向 SE,倾角  $45^\circ\sim50^\circ$ 。华蓥山断裂带沿 NNE 方向平行延伸,剖面上表现为数条高倾角、迭瓦式逆冲断层。本区存在四组节理:1 组,走向 NNE,倾  $SEE\angle40^\circ\sim\angle50^\circ$ ;2 组,走向 NNE,倾  $SWW\angle10^\circ\sim\angle30^\circ$ ;3 组、4 组,走向 NNE,分别倾 S、倾 N,角度变化大,为剪张性节理。

### 1.3 水文地质特征

本区属亚热带湿润季风气候区。处于暴雨降雨中心、降雨频率高、强度大,多年平均

本文收稿日期:1997-04-07。

降雨量达 1 688. 8mm/a, 最大 2 020. 23mm/a. 一般暴雨强度 50mm/h, 最大 88. 6mm/h (1989-07).

本区地下水有三种类型: 基岩裂隙水、岩溶水和孔隙水. 大气降水为补给水源. 基岩裂隙水主要富集在须家河组砂岩的粗大孔隙和密集裂隙中, 埋深达数十米, 局部具承压自流条件; 水质类型  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型或  $\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$  型. 岩溶水分布于寒武系、二叠系、三叠系灰岩、白云岩中, 具不均一性; 水质类型  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型或  $\text{HCO}_3-\text{Ca, Mg}$  型, 无侵蚀性. 潜水则赋存于槽谷河道卵砾石层和崩积物残积体中, 常以泉水方式出露, 或直接排泄, 补给河流, 水质类型  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型.

## 2 斜坡变形破坏机制及特征研究

### 2.1 斜坡类型及坡体结构特征

溪口斜坡为上硬下软内倾层状类型, 发育于  $F_7$  断层附近, 硬岩为寒武系白云岩, 多位于  $F_7$  断层上盘, 软岩为志留系泥岩, 多处于  $F_7$  断层下盘. 经后期差异风化, 泥岩剥蚀后成凹地形, 常被白云岩风化破碎岩体的塌落、滚石等物质覆盖. 白云岩随风化作用加剧, 块体不断趋于破碎常以块石坠落、滑塌等方式小规模变形破坏、卸荷消能, 调整坡形.

溪口滑坡坡体中存在钙质断层角砾岩. 钙质角砾岩生成于  $F_7$  断层带, 是滑坡体中唯一的连续完整结构岩体, 其上部为白云岩强风化带松散结构岩体, 厚度约 15m; 下部志留系在风化页岩上则覆盖约 10m 的崩坡积物(图 1). 这三部分(海拔 640~800m)组成了溪口滑坡坡体, 体积约  $18 \times 10^4 \text{m}^3$ ; 累加海拔 800~850m 的 II 次滑塌体积接近  $20 \times 10^4 \text{m}^3$ .

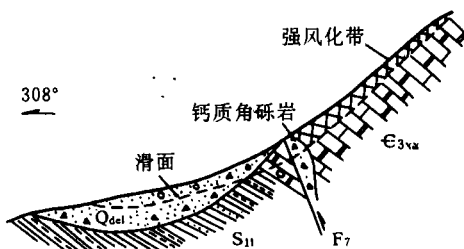


图 1 溪口滑坡坡体结构示意图

Fig. 1 The structural profile of Xikou Landslide

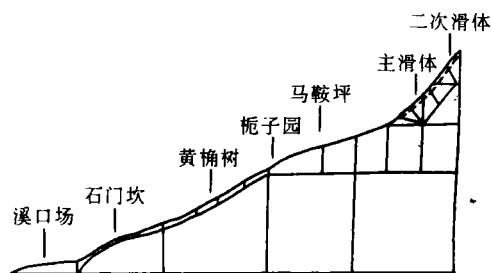


图 2 溪口滑坡离散元计算模型

Fig. 2 The computation model for discrete element of Xikou Landslide

### 2.2 溪口滑坡碎屑流运动特征的离散元模拟

为反演溪口滑坡碎屑流运动过程及特征、分析亮水凼、斜坡变形体的弯折、倾倒机制, 引用了可考虑几何非线性大变形特征的离散单元法进行模拟分析. 离散单元法是一种可考虑单元块体大变形及运动特性的一种数值方法<sup>[1~3]</sup>, 其理论基础是牛顿第二运动定律. 其计算模型见图 2.

由于除滑坡块体外其余块体均被固定, 只允许滑坡组成块体发生变形、运动, 因此边界荷载及大小对滑坡块体变形、运动不产生任何影响. 滑坡块体的变形、运动完全系重力

作用所致。另外,滑床以下基础对其变形、运动特征毫无影响,只是为滑坡块体的变形运动提供一个固定的空间参照系。因此为计算方便,视模型范围内为与滑坡岩体相同的材料类型。溪口滑坡块体由强风化带碎裂结构岩体组成,岩性相同,成因相同,状态相近,可认为组成滑坡块体的接触面强度完全相同。经此简化处理后的模型计算参数(表 1)。其中节理参数以经验类比确定,节理面法向刚度赋值则主要是避免滑坡组成块体与滑床基岩产生太多、过大的叠合,以使其符合实际情况。

表 1 溪口滑坡离散元模拟计算参数

Table 1 Calculating coefficient for discrete analog of Xikou Landslide

结构面 组 数	接触摩 擦系数	接 触 法 向 刚度(N/m)	接 触 切 向 刚度(N/m)	节理面摩 擦系数	节理面法向 刚度(N/m)	节理面切向 刚度(N/m)	块体联 结 力	岩石密度 (MPa/m)
1	0.27	20.000	200	0.21	16.000	150	0	0.027

离散元模拟成果(图 3)形象地再现了溪口滑坡的变形、运动过程。反演表明,溪口滑坡体发育的初期以前缘块体变形最大,这些块体在上部滑体的推动下,除产生向前的位移,还造成了向上隆起的变形。这证实了当地居民所观察到溪口滑坡先拱后滑的破坏现象。之后,滑坡主体迅速下滑,上部小三角面部位滑体失去支撑、失稳形成二次滑塌(图 3-a, b)。坡体失稳后迅速解体,疾冲马鞍坪。这一阶段前缘块体运动较为平稳,后部则碰撞跳跃,推动前缘滑体加速运动。从而前缘滑坡速度增大,中部因受挤压而略有隆起,体现了滑坡块体内部碰撞加速机制(图 3-c)。经马鞍坪平台后,前缘运动块体水平运动速度分量逐渐增大(图 3-c~e),以平抛运动方式越过柘子园海拔 530~600m 陡坎,进入高速径流区。可以看出,滑坡块体进入高速径流段初期具有很大的跳跃高度,最大可高出沟底 15m,因而使视觉过流断面显得很大。随着径流途径的延长,运动块体随动能消耗而跃越渐弱,对流断面高度渐低,视觉过流断面与实际碎屑过流断面趋于一致。接近石门坎时,过流断面内已基本完全由固体碎屑流充填(图 3-e~h),且断面内空气和水分比例渐大。可见,溪口滑坡解体后,确切地讲应该是以一种碎屑流的方式完成了运移和停积过程。

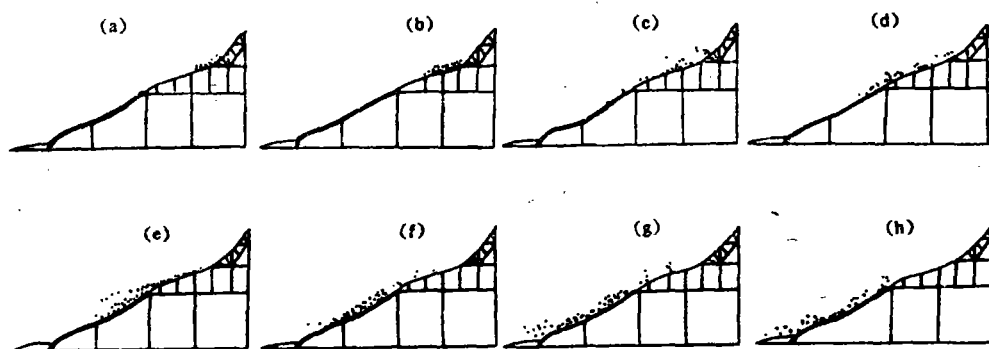


图 3 溪口滑坡离散元模拟成果(a~h)

Fig. 3 The analog results for discrete element of Xikou Landslide

离散元模拟分析比较好地拟合反映了溪口滑坡碎屑流的运动过程和主要特征。但应当指出,与溪口滑坡碎屑流实际运动过程相比较,仍有两个问题未能得到圆满解决:1. 马鞍坪平台上滑坡块体堆积现象未能反映出来。2. 碎屑流自马鞍坪平抛后,流体运动方向发生偏转,其流速所受影响和扇形抛出形象亦未能反映出来。这些问题有待于从模拟原理和模型抽象两方面作更深一步的研究和完善才能解决。

### 参 考 文 献

- [1] 胡广韬. 动力滑坡学. 西安:陕西科学技术出版社,1988. 1~200.
- [2] 王泳嘉,刑纪波. 离散单元法. 沈阳:东北工学院出版社,1991. 5~125.
- [3] 尚岳全等. 工程地质研究中的数值分析方法. 成都:成都科技大学出版社,1991. 207~229.

## DISCRETE ANALOG OF MOTION FEATURE OF LANDSLIDE IN XIKOU, SICHUAN PROVINCE

Wu Yong

(Department of Water Conservancy, Sichuan Union University Chengdu 610065)

Li Ziting

(Department of Machinery, The Second Exploration and Designing Institute Chengdu 610066)

Li yongjian

(General Moniting Station of Geological Environment of Sichuan Province Chengdu 610072)

### Abstract

Xikou landslide located in the inverted limb of Baoding anticline of Huayong anticlinoria. The strata is falling home, and the upper is hard, the lower is soft. It is beside the fault. The hard is dolomite and the soft is mudstone. There are fault calcibreccia in the landslide, and the calcibreccia are coherent mass, intact rocks only. In the paper, a playback of the deformation and motion of Xikou Landslide has been made with discrete analog method. The result of inversion shows that the front mass of landslide is the biggest deformation early. The mass is pushed by upper sliding mass, and there are some displace and upward deformation. They are flow of debris and clast in motion and resting process after landslide disintegrate.

**Key words** Sichuan Province, Xikou Landslide, discrete analysis, motion process.