June, 2007

文章编号: 1672-3031(2007) 02-0115-06

贵州印江岩口滑坡过程的数值模拟分析

刘朋辉¹,魏迎奇²,杨昭冬²

(1 北京工业大学 建筑工程学院 北京 10002; 2 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所,北京 100044)

摘要: 在对贵州印江岩口滑坡工程地质背景资料和地质条件进行详细研究的基础上, 利用离散元方法建立了滑坡 的计算模型, 对滑坡滑动的整个过程进行了仿真模拟, 着重分析了滑坡后部点、中部点和前部点滑动位移与速度的 变化规律以及滑坡的堆积形态, 并与实测数据进行了对比。计算结果表明, 根据位移和速度的变化, 可把整个滑动 过程分为4个阶段: 即启动加速阶段、高速运动阶段、碰撞减速阶段和缓动夯实阶段; 较准确的模拟了滑坡体的灾 害影响范围和堆积规模; 通过对滑体不同点位移和速度的分析, 进一步明确了滑坡为牵引式滑坡和不同点在速度、 位移和加速度上的变化规律。研究表明, 对滑坡滑动过程的数值模拟可以进一步认清滑坡滑动和转化的本质, 这 将为合理治理滑坡、估算滑坡体对其下方建筑物的破坏范围和冲击破坏力以及灾害的合理评价提供基本依据。 关键词: 岩口滑坡; 离散单元法; 运动过程仿真

中图分类号: P642 22 文献标识码: A

1 研究背景

1996年9月18日23时,位于贵州省印江县城东面41km处的岩口河段,发生了大型岩体滑坡堵江 事件,滑坡体在河内形成514m高的天然堆石坝,阻断了印江河和印江-松桃公路,造成河水水位上涨, 形成了一个3900万m³、最大水深41m的堰塞水库,淹没了上游郎溪镇、1个电站和3处提水站,造成3 人死亡、2人失踪的巨大灾害,直接经济损失人民币157亿元以上^[1,2]。

目前应用于滑动大变形的分析方法主要有离散单元法和流形元法,如程谦恭等^[3]利用离散元对大 板桥滑坡的整个过程进行了模拟,裴觉民等^[4]利用流形元法对岩石边坡进行了动态稳定分析等,但由于 离散元相对简单而得到迅速推广。适用于岩石力学的离散元法最早由 Cundall^[5]于 1971 年提出,随后 Cundall 等^[6-8]又提出了适用于土力学的离散元法。离散元法的基本方程包括两部分:一是物理方程,表 示块体间接触点力与位移的关系,不同的物理方程(本构关系)形成不同的离散单元法,其中最简单的是 莫尔-库仑定律,但更符合实际的是各种不同的节理模型^[9];二是块体运动方程,包括牛顿第二运动定 律、柯西运动方程和欧拉运动方程,它们的建立和求解是离散法的中心和关键。之后王泳嘉等^[9]将离散 元法引入我国,并迅速在岩土力学界得到了肯定和发展,近年来不同学者^[10~14]分别将其应用于边坡、采 矿、隧道和大坝等工程的设计和研究中。

为探讨岩口滑坡滑动的本质,本文在对贵州印江岩口地质背景及工程地质条件进行详细分析的基础上,利用离散元法对岩口滑坡的整个滑动过程进行仿真模拟,着重分析滑坡的滑动过程中位移、速度和加速度的变化规律及其堆积形态,以便更好地认识滑坡滑动机制。

2 工程地质条件

资料显示^[2, 15], 研究区的坡体主要为三叠系夜郎组玉龙山段 (T_1y^2) 厚层石灰岩和沙堡湾段 (T_1y^1) 薄 层泥页岩组成, 岩层倾向为 SE 110, 倾角 30 左右, 与坡向呈 45 交角, 斜坡倾向 NE。坡面由百余米高的

收稿日期: 2007-10-09

作者简介: 刘朋辉(1981-), 男, 河北新乐人, 主要从事岩土工程研究。E-mail: liuph1234@126. com

陡崖与斜坡相结合,组成倾向河谷的多级阶梯地形,坡面坡角一般为 22 ~ 50,局部可达 57。印江河床 南岸 $T_1y^1 - T_1y^2$ 岩体被侵蚀切割,形成高达 30 余米,以 T_1y^1 泥页岩等软弱层为底面,上覆 T_1y^2 厚度很大 的灰岩体临空面,临空高度达 30~40m。同时坡脚采石场向山体内的 T_1y^2 灰岩体开挖采石,采掘纵深达 60m,使 T_1y^2 下部岩体也形成 30~40m 高的陡崖临空面。坡体南侧 T_1y^2 灰岩被一条近东西向的构造大 裂隙切割,使之与母岩体分离开来,它的存在为降雨入渗提供了条件。

地质构造主要包括 3 个部分(如图 1 所示): (1)T₁y² 段石灰岩组。中厚- 厚层状石灰岩,底部间夹 薄层状泥灰岩及钙质页岩。它是组成滑体的主要岩体,岩体强度较高,厚度大,发育有 3 组贯通性较好 的裂隙; (2)T₁y¹ 页岩、泥灰岩组。薄层状地层,组成滑体的下部物质。该岩组下部有一薄层物质,随着 大气降水的渗入,、 值迅速降低,它是滑坡主要的潜在滑动面。其中未风化的泥灰岩强度较好,控制 着滑动面锁固段的形成及变形破坏,在滑坡形成过程中起着主要控制作用; (3) P₂C 段石灰岩组。厚层 状石灰岩、燧石灰岩,厚度大,强度高,裂隙不太发育,为滑体物质运动提供了坚硬的滑床。



 ¹ 现实地形线; 2 推测滑前地形线; 3 滑动面; 4 推测T₁y¹ 与T₁y² 分界线; 5T₁y² 中厚、厚层状微晶灰岩;
6T₁y¹ 薄层页岩、泥灰岩; 7 P₂C 厚层含燧石石灰岩
图 1 滑源区斜坡地质结构示意

- 3 离散单元法仿真分析
- 31 离散元基本方法

(1)物理方程。据有关文献[9,16]可知,在离散元中,物理方程是假定块体间的相互作用力与其相 对位移成正比,即法向力 *F*_n和 叠合 位移 *u*_n 的关系是

$$F_n = K_n u_n \tag{1}$$

由于切向力 F_c 与运动状态和加载历史有关, 宜用增量形式表示, 即

$$F_t = K_t \quad u_t \tag{2}$$

式中: K_n 和K_t 分别为接触点的法向和切向刚度。

(2)运动方程。确定接触法则下的块体运动方程为:

$$\begin{cases} mu_{x} + cu_{x} = \prod_{i=1}^{n} (F_{x}^{i} + D_{x}^{i}) \\ m_{y} + cu_{y} = \prod_{i=1}^{n} (F_{y}^{i} + D_{y}^{i}) + mg \\ I + c = \prod_{i=1}^{n} M_{i} \end{cases}$$
(3)

式中: u_x 、 u_x 和 u_x 分别为块体重心处的位移、速度和加速度的水平分量; u_y 、 u_y 和 u_y 分别为块体重心处的位移、速度和加速度的竖直向的分量; 、和 分别为重心处的旋转角、转动角速度和角加速度; n为块体与其相邻块体的接触数目; m、I分别为块体质量和关于重心处的转动惯量; c和c分别为平动和转动的整体黏性阻尼, 且 c = am, c = aI, a为整体黏性阻尼常数; F_x^i 、 F_y^i 分别为第i个接触力的法向和切

向分量 F_n^i 和 F_t^i 的投影求得; D_x^i 、 D_y^i 分别为第i个黏聚力在x和y方向的分量; g为重力加速度; M_i 为第i个接触点上,接触力和黏滞力关于重心的力矩。

(3) 数值计算方法。若考虑质量阻尼,则将 c= am 代入式(3), 按块体 i 计算可得

$$\frac{u_j^{i+l^2} - u_j^{i+l^2}}{t} = \frac{F_j}{m} - a \left[\frac{u_j^{i+l^2} + u_j^{i-l^2}}{2} \right] + g_j$$
(4)

式中: u_i 为块体形心速度分量; F_j 为块体所受合力的分量; g_j 为块体的重力加速度分量(j = x, y)。 由此可得 t + t 2 时刻的速度分量为

$$u_{j}^{\mu \ i^{2}} = \left[u_{j}^{\mu \ i^{2}} (1 - \frac{a \ t}{2}) + \frac{F_{j}}{m} + g_{j} \right] t (1 + \frac{a \ t}{2})$$
(5)

对于转动, 同理可得

$${}^{\mu} {}^{I^{2}} = \left[{}^{\mu} {}^{I^{2}} \left(1 - \frac{a}{2} \right) + m t I \right] \left(1 + \frac{a}{2} \right)$$
(6)

最后可以得到块体的新位移为

$$\begin{cases} u_{j}^{t+t} = u_{j}^{(t)} + u_{j}^{t+t/2} t \\ u_{j}^{t+t} = (t) + t^{t+t/2} t \end{cases}$$
(7)

式中: u_j 为块体形心的位移分量(j = x, y)

通过反复迭代,使集合体达到新的平衡位置为止,以实现对整个滑坡滑动过程的动态仿真。计算采用 UDEC 离散元分析程序。

3 2 滑坡计算参数的选取 计算参数来源于对试验数据的合理分析,同时也要考虑边坡的实际地质情况。在实际取值时,首先查清边坡岩体的地质条件,通过对岩体不同结构面以及岩体的工程地质性质进 行类型划分,确定合理的试验点,利用有限试验资料直接确定抗剪强度计算参数。在确定容重、摩擦系 数和刚度时分别进行了多个点的平均,使其参数更具普遍性。对节理内聚力确定时采用工程类比法进 行,并依据当地的一些经验确定。本次计算采用的力学参数如表 1 所示。

材料类型	容重 (kg m ³)	接触摩 擦系数	接触切向刚度 10 ⁹ (Pa m)	接触法向刚度 10 ⁹ (Pam)	节理面 摩擦系数	节理面的切向刚度 10 ⁸ (Pam)	节理面的法向刚度 10 ⁹ (Pam)	节理内聚力 10 ³ Pa
$T_1 y^2 层$	2 600	0 80	3 0	90	0 70	8 0	6 0	8
$T_1 y^1 \mathbf{E}$	2 400	0 50	2 0	6 0	0 50	4 0	5 0	0
软弱带	2 400	0 25	2 0	5 5	0 22	1 8	3 0	0
$P_2 C 层$	2 700	0 80	90	10 0	0 80	80 0	20 0	25

表1 离散元计算模型参数

3 3 运动过程仿真模拟及精度检验 由于离散单元法是根据节理提出的,因此准确合理的在滑坡模型 中描述节理走向对滑坡计算过程的精确度至关重要。本文根据滑坡实际的节理分布和开挖情况建立仿 真计算模型,由于南侧的构造大裂隙与底层软弱带相连,为方便起见,把它看作边坡滑动边界(滑动面) 的一部分,如图 2(a)所示。根据计算分析可以得出滑坡整个运动过程可分为启动加速阶段、高速运动 阶段、碰撞减速阶段和缓动夯实阶段,计算各阶段的滑坡变形体的运动状态和解体过程模拟结果如图 2 (b)~(f)所示。

由图 2(b) 可见, 边坡破坏首先从开挖处和最低处坡角开始, 逐渐向上发展, 最后整个滑体沿软弱结构面以极高的速度下滑冲向河谷并堵塞河道, 主要过程历时将近 33 54s。滑动结束时将在印江河上形成一个约 55 5m 高的堰塞坝, 与实际观测到的淤塞坝坝高 51, 4m^[2 15]相比, 仅相差 4 1m。计算表明, 当 滑体停止运动时, 滑坡主体分布在印江河的中心部位, 残留体一直沿伸到坡体的顶部高程, 其分布的高 程和范围与实际情况^[2]基本相似(见图 3 所示)。



3 4 成果分析 计算时对滑体不同位置点进行跟踪,可以了解滑体位移与速度在空间和时间上大小和 方向的变化趋势。计算结果表明以下几点:

(1)由于降雨引起滑坡面抗剪强度的降低和人工开挖的影响,使滑坡体向下的有效力迅速增大, 以致采石场至公路间失稳的岩体沿临空面首先剪出,迅速滑入滑床。此时则空出了大约100m的滑床, 使滑坡中、上段庞大的不稳定结构体呈悬空状。由于滑坡的支撑力的下降,使滑体中、上部的稳定性迅速下降,最终导致大面积滑坡的发生。可以将此滑坡归为前缘首先破坏的牵引式滑坡。

(2)由于右岸陡崖的阻隔,滑体前部结点1的水平位移最小,为100m 左右,而后部结点3由于受右 岸陡崖阻隔的影响小,其最大水平位移达到了300m 左右。在垂直方向上,由于受右岸陡崖的阻挡,前 部结点的竖向位移先下后上,产生冲向右岸的 爬坡现象。而中后部结点在竖向的位移基本保持向下 滑动的趋势,具体位移历时过程如图4所示。



(3) 在水平方向上, 滑体中后部位的速度基本表现出一致的规律, 滑动速度的波动性较小, 滑动相对 要平稳, 滑体前部由于结点间的相互扰动, 其速度在高速滑动阶段有很大幅度的波动。在碰撞减速阶段 前部结点的速度波动剧烈, 反映出块体之间的扰动、碰撞的剧烈程度, 如图 5 所示。中后部块体的水平 速度随滑动的结束锐减, 从图上可以看出, 滑块间的相互扰动程度相对小一些, 且表现出越向前波动越

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net





图 5 滑坡体典型结点速度变化(X 和 Y 分别表示 X 和 Y 方向的速度分量)

(4) 通过不同时刻速度的对比分析表明, 滑体的夯实阶段滑体前部受到阻挡先停下来, 后部块体受 到前部块体的阻挡逐渐停滞下来。滑体的速度 消散 经历了一段较长的时间, 说明滑坡的蠕动夯实需 要一定的时间才能完成。

(5) 根据滑动过程中滑速的演化关系, 整理平均速度、平均加速度和位移与历时的关系(如表 2 所示) 可以看出, 将滑动全过程划分成启动加速阶段、高速运动阶段、碰撞减速阶段和缓动夯实阶段 4 个阶段是合理和准确的。刚刚启动阶段, 平均滑速较低, 表现出一定的蠕滑特性。这是由于滑坡体滑动面所受的阻力和摩擦力较大。随着蠕变位移的不断增大, 滑动面已趋于全面贯通, 此时面上所受的力主要为摩擦力, 由于阻力的降低, 滑体的加速度突然增大, 这时表现出一定的 弹冲 效应, 速度和位移均明显增大。随着滑体的下滑, 加速度在一定时间段内趋于稳定值, 平均速度和平均位移逐渐达到阶段内的最大值, 滑体进入高速滑动阶段。但随着坡体前部与右岸陡崖的接触和阻隔, 前部坡体的加速度首先减小, 并阻隔后面滑体的滑动, 逐渐和依次降低中部和后部滑坡体的速度, 最后滑坡体自前而后逐渐停止滑动, 进入缓动夯实阶段。同时可以看出滑坡的主滑时间大约经历 20s 左右, 其对应时间也与徐文等^[2] 描述的较为一致。

	历时 s	阶段内平均速度 (m s)	平均加速度 (m s ²)	位移 m
启动加速阶段	2 01	15 77	2 02	967
高速运动阶段	6 71	27 30	1 24	176 6
碰撞减速阶段	4 02	6 83	- 5 09	40 1
缓动夯实阶段	13 42	0 06	- 0 50	19

表 2 滑坡演化各阶段的成果

4 结论

(1)通过对滑坡发生的过程进行分析,可以将此滑坡归为前缘首先破坏的牵引式滑坡;(2)采用离散 元方法可以完整形象的再现滑坡体的整个运动过程。将整个过程分为4个阶段,即启动加速阶段、高速运动阶段、碰撞减速阶段、缓动夯实阶段,同时停止时的坝型也和实际较为相似;(3)确定了滑坡所在整 个滑动过程中的速度、加速度和位移,预测了滑坡体的破坏影响范围和规模;(4)通过对滑体不同点位移 和速度的分析,可以进一步认清滑坡的滑动机理,为滑坡的进一步合理治理、估算滑坡体对其下方建筑物的破坏范围和冲击破坏力以及预防和灾害评价提供依据。

但同时也应该看到,此模拟方法是假设开始阶段和高速滑动阶段土石体参数是相同的,而实际上滑 坡起动破坏阶段和后续阶段参数不会相同,所以此模拟方法仍有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 田文.贵州印江岩口大型山体滑坡及防治对策[J].贵州地质, 1997, 14(4): 376-378.
- [2] 徐文,郭强.贵州印江岩口滑坡特征及其应急整治[J].贵州地质, 1998, 15(2): 160-165.
- [3] 程谦恭,彭建兵,胡广韬等. 高速岩质滑坡动力学[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1999.
- [4] 裴觉民,石根华.岩石滑坡体的块体动态稳定和非连续变形分析[J].水利学报,1993,(3):28-34.
- [5] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system[A]. Muller L ed. Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mechanics[C]. Rotterdam: Balkama: AA., 1971.(1):8-11.
- [6] Strack O D L, Cundall P A. The distinct element method as a tool for research in granular media[A]. Part . Report to the National Science Foundation [C]. Minnesota: University of Minnesota, 1978. 36–46.
- [7] Cundall P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media[A]. Part . Report to the National Science Foundation[C]. Minnesota: University of Minnesota, 1978. 56–67.
- [8] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assembles[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47– 65.
- [9] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [10] 徐泳,孙其诚,张凌,等.颗粒离散元研究进展[J].力学进展,2003,33(2):251-260.
- [11] 安关峰, 殷坤龙, 唐辉明. 黄土坡滑的离散元研究[J]. 地理科学, 2002, 27(4): 465-468.
- [12] 侯克鹏, 阮永芬. 离散元法模拟边坡稳定性若干问题探讨[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(1):93-96.
- [13] 程谦恭, 胡厚田. 剧动式高速岩质滑坡全程运动学数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1):18-22.
- [14] 郑书彦. 滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [15] 邓辉. 贵州省印江岩口滑坡形成机制分析和治理优化设计[D]. 成都: 成都理工学院, 1999.
- [16] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

Numerical simulation analysis of the process of Yankou landslide in Yinjiang River of Guizhou

LIU Peng hui¹, WEI Ying qi², YANG Zhao dong²

College & Architecture and Civil Engineering, Beijing University & Technology, Beijing 100022, China
Dept. & Geotechnical Engineering, IWHR, Beijing 100044, China)

Abstract: On the basis of analyzing geological background data and engineering conditions of Yankou landslide, a discrete element model was set up to simulate the sliding process. The sliding distance and velocity of the back, middle and front parts of the landslide and the accumulation configuration of the landslide are simulated and compared with the measured data. The evolution process of landslide could be divided into 4 periods: beginning and accelerating period, quick moving period, braking period and tamping period. The damage scope and accumulation extent are also simulated satisfactorily. The pull-type and mechanism of sliding process can be recognized by analyzing the distance, velocity and acceleration. The study shows that numerical simulation of sliding evolution would reveal the sliding mechanism and evaluate the damage extent. Some reasonable countermeasures can be worked out. **Key words**: Yankou landslide; discrete element method; numerical simulation of process

(责任编辑: 韩昆)