

# 节理岩体圆形洞室岩爆过程的离散元分析与模拟\*

乐晓阳<sup>1</sup> 谭国焕<sup>2</sup> 李启光<sup>2</sup> 徐 钺<sup>2</sup> 王元汉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中理工大学土木建筑工程学院 武汉 430074) (<sup>2</sup>香港大学土木工程系岩石工程研究中心 香港)

**摘要** 采用刚体离散单元法对节理岩体圆形洞室的岩爆过程进行了数值分析与模拟,并与有限元的数值分析结果、岩爆现场实测结果进行了比较,相当一致。说明采用离散单元法对节理岩体洞室岩爆过程进行数值分析和数值模拟是可行的。

**关键词** 离散单元法, 节理岩体圆形洞室, 岩爆

**分类号** O 242 1

## 1 引言

一直以来,人们对围岩稳定性的数值分析多采用有限单元法,而对围岩失稳过程的物理模拟研究则多采用相似材料模型试验和大型现场模型试验。但是,一般情况下的岩体为非连续性、非均质性的复杂介质,若再采用有限单元法就需要很大的存贮容量和计算量,而且由于相邻界面位移必须协调,对于奇异性问题的处理比较麻烦,这些都是有限单元法的不足之处;相似材料模型试验和大型现场模型试验虽能较好地模拟失稳过程,但花费过于昂贵。于是,人们不断寻求新的数值方法来研究岩体力学中的此类问题。离散单元法的提出,使长期困扰人们的富含节理岩体的数值模拟问题找到了较为满意的解决途径。本文采用离散单元法对节理岩体圆形洞室岩爆过程进行数值分析和数值模拟。离散元分析结果与现场实测结果及有限元分析结果相比较,取得了相当程度的一致,并且还能够模拟岩块崩落的过程,比有限单元法分析更为方便和适用。

离散单元法最早是由Cundall于1971年提出的一种不连续数值模拟方法,适用于模拟节理系统或颗粒组合体在准静态或动态条件下的变形过程,它是建立在最基本的牛顿第二运动定律之上的。

有关离散单元法的基本原理可参见文[1~3],下面主要介绍采用这种方法模拟节理岩体圆形洞室岩爆过程的实施过程与结果分析。

## 2 计算参数的选取与计算步骤

### 2.1 计算模型的选取

本文的计算采用发生于贵州南盘江天生桥水电站圆形隧洞的岩爆实例。隧洞修建在石灰岩和砂页岩中,节理发育充分,岩质较硬。隧洞长约10 km,直径为10 m。主洞平均埋深400 m,最大埋深为760 m,发生岩爆部位埋深为200~250 m。按照节理的特征采用如图1的离散元计算模型。

### 2.2 岩体力学参数的选取

按文[3]提供的资料,有关力学参数如下选取:水平地应力 $\sigma_h = 15.78 \text{ MPa}$ ,垂直地应力 $\sigma_v = 12.14$

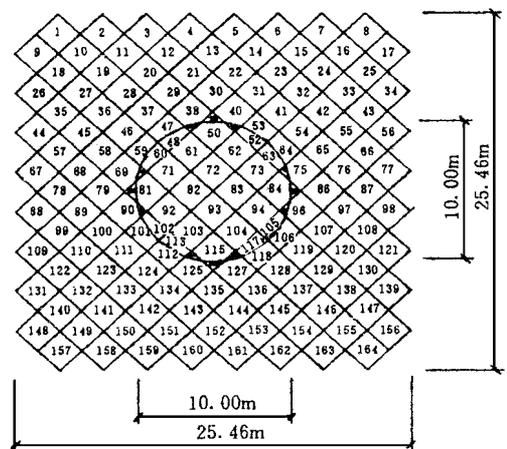


图1 离散单元法计算模型

Fig 1 Calculation model of the discrete element method

1998年10月8日收到初稿,1998年11月12日收到修改稿。

\* 香港研究资助局(RGC)和国家教委博士点基金资助项目。

作者 乐晓阳 简介:男,1974年生,硕士,1996年毕业于华中理工大学土木工程系,现在深圳市政府投资项目审计中心工作。

M Pa, 粘聚力  $c = 0.75 \text{ M Pa}$ , 摩擦系数  $f = \tan \varphi = 0.4$ , 容重  $\gamma = 27.6 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量  $E = 3 \times 10^4 \text{ M Pa}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ .

### 2.3 离散单元法计算参数的选取<sup>[1, 2]</sup>

#### (1) 计算时步的选择

在选择尽可能大的时步的前提下, 尚须满足

$$\Delta t \leq 2\sqrt{m/K} \quad (1)$$

式中:  $m$  为块体的质量,  $K$  为块体的刚度系数, 须选择各种不同组合的  $m/K$  的最小值, 才能确定  $\Delta t$  的最大可能值。由式(1)得出的时步值, 一般再乘以 10% 的折减系数在计算中应用。

#### (2) 刚度系数 $K_n, K_s$ 的选择

节理切向和法向的接触刚度系数可由下列公式计算:

$$K_n = \Delta EA / 2\Delta l \quad (2)$$

$$K_s = K_n / [2(1 + \mu)] \quad (3)$$

式中:  $\Delta$  —— 岩块的平均尺寸,  $A$  —— 单位宽度,

$\Delta l$  —— 节理裂隙宽度。

#### (3) 阻尼系数 $\alpha, \beta$ 的选择

$\alpha, \beta$  为 Rayleigh 阻尼常数, 可写为

$$\alpha = 2\pi f_{min} \lambda_{min} \quad (4)$$

$$\beta = \lambda_{min} / (2\pi f_{min}) \quad (5)$$

式中:  $f_{min}$  —— 系数基频,  $\lambda_{min}$  —— 系统临界阻尼比。

### 2.4 计算结果

如图 1 所示, 保持竖直压力不变的情况下, 并且固定两侧的边缘岩块, 将 48, 49, 50, 51, 52, 60, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 73, 74, 81, 82, 83, 84, 91, 92, 93, 94, 95, 102, 103, 104, 105, 113, 114, 115, 117, 118 号块体“开挖”掉, 以求模拟开挖过程。由于“开挖”而导致应力的重分布, 洞周各块体开始运动, 具体过程参见不同时步的块体位移图(如图 2)、块体的应力分布图(如图 3)以及块体速度分布图(如图 4)。

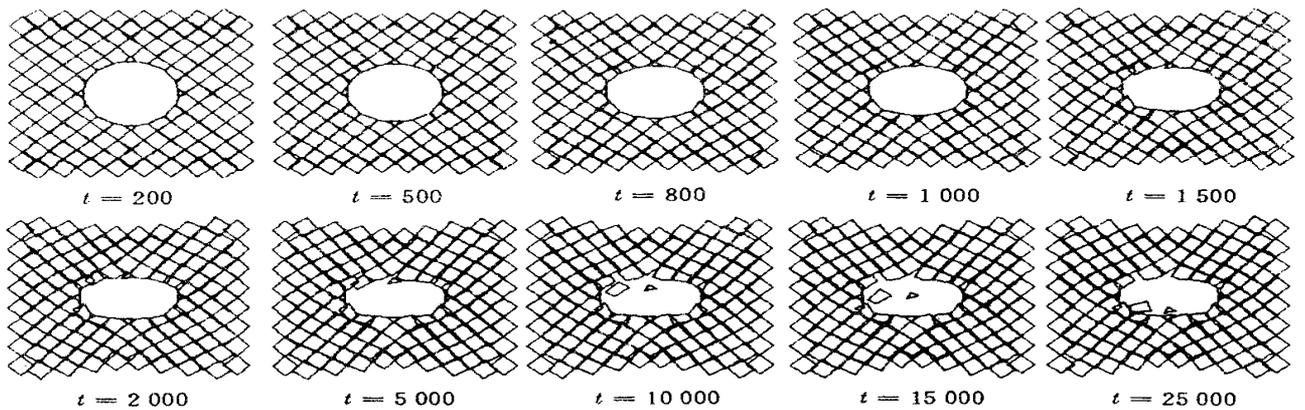


图 2 不同时步的块体位移场

Fig. 2 Displacement distribution of blocks in different step

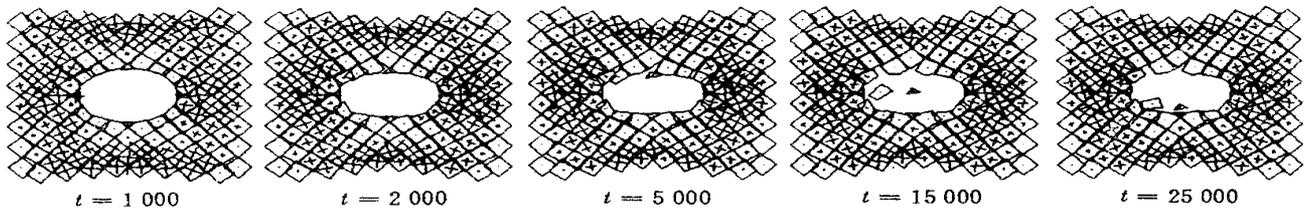


图 3 不同时步的块体应力场

Fig. 3 Stress distribution of blocks in different step

## 3 与实际岩爆情况及有限单元法分析比较

### 3.1 岩爆的实际情况

岩爆部位的岩石为灰岩, 并含方解石团块, 岩石

新鲜, 较坚硬, 性脆。岩爆部位在洞顶偏左(如图 5), 与掌子面距离约 1 倍直径处, 开挖后 24 h 内活动频繁, 延续 30~60 d 后逐渐减弱或停止。发生岩爆时有冰块开裂声, 破坏深度为 50 cm。塌落最大处在顶部正中偏左。围岩在 5 m 深度之内取不到大于 10 cm 的岩芯, 根据地质雷达探测, 围岩 3 m 深度内

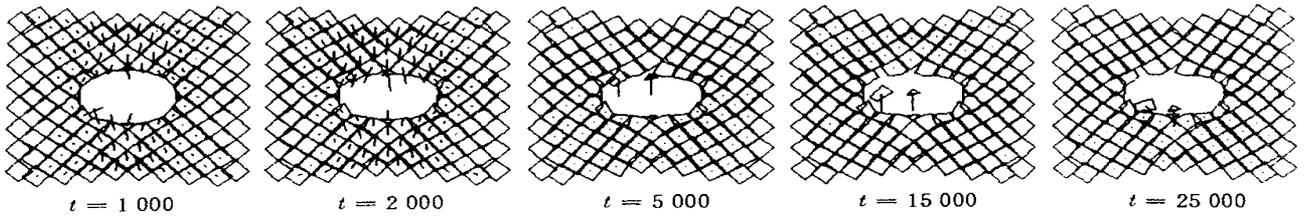


图 4 不同时步的块体速度场

Fig 4 Velocity distribution of blocks in different step

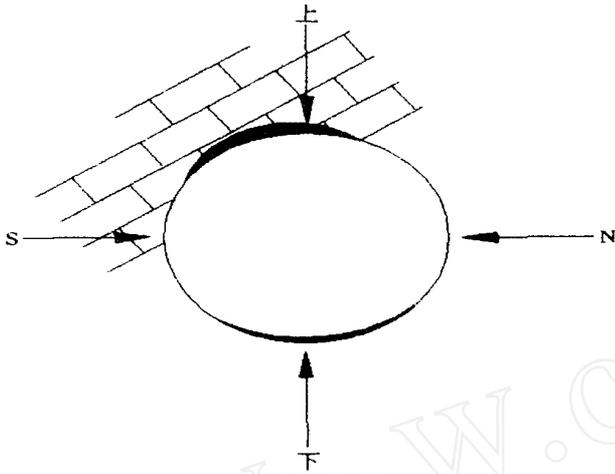


图 5 岩爆破坏范围实测结果

Fig 5 The actual failure situation of rock-burst

为松动圈, 3~ 4 m 处出现一个岩石密度较大的环带, 4~ 4.6 m 又出现一个松弛圈, 圈外的岩石完好。实际岩爆烈度为 1 级, 破坏区有岩石破裂并脱落, 破坏区以外的岩石仅有破裂。

### 3.2 有限单元法的分析结果

文[4]中, 首先以有限元方法进行了圆形断面应力集中分析, 得到围岩应力场, 再应用 Griffith 准则判别应力状态确定破坏区(如图6)。从文[4]围岩应力场中可以看到, 洞顶岩爆处最大应力计算值为 32 MPa。由图 6 看到, 岩爆最大破坏区深度为 40 cm。由计算结果, 应力状态只达到 Griffith 准则, 岩爆烈度为 1 级。

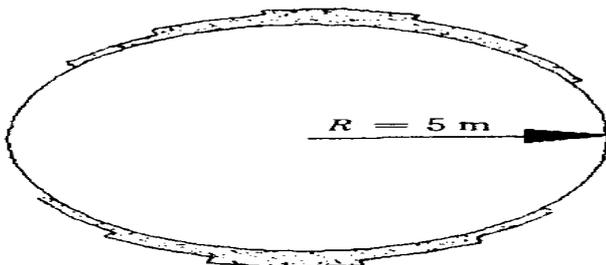


图 6 岩爆破坏范围有限元计算结果

Fig 6 FEM results of the failure situation of rock-burst

### 3.3 离散单元法的计算和模拟结果

岩爆发生部位与实际情况一致, 在洞顶偏左的 39, 47 号岩块发生脱落, 而 38 号块体所以未脱落, 是由于被 37 和 30 号块体“卡”住了。39, 47 号岩块的周围岩块亦发生松动破裂, 而洞底的岩块亦有松动破坏现象, 松动范围约有 4.5~ 5 m, 这是与实际情况相符合。39, 47 号岩块脱落前的最大应力计算值为 30.58 MPa, 比有限元方法的计算值略小, 可认为是一致的。39 号岩块的最大速度只有 0.77 m/s, 而且从图 6 也可看出岩爆烈度不高, 只有岩石的松动、破裂、脱落, 应属中等岩爆活动, 据 Russense 的岩爆烈度分级表描述, 可定性地定为 2 级。这与文[4]中, 实际岩爆大于有限元计算结果的阐述是相反的, 计算结果大于实际情况, 这可能与实际岩体较完整, 而计算模型岩体较破碎有关。由于采用的加载方式是固定两侧的单元, 只施加  $\alpha$ , 因而洞室的变形方式宏观上看来是被“压扁”了, 这与实际情况不符。但由于刚度系数本来就是一个假定的量, 位移当然也是不真实的, 只要能模拟洞室的变形过程就达到目的了。而破坏区的深度达到 1 m 左右, 这主要是单元划分不够多的缘故, 适当增加单元可解决这一问题。最重要的一点是, 离散单元法模拟出了整个岩爆的过程, 为洞室的支护设计及岩爆的预报、预防工作提供了一些有限元法无法提供的数据与资料, 这是本文所做工作的意义所在。

## 4 结 论

离散单元法使长期困扰人们的富含节理岩体的数值模拟问题找到了较为满意的解决途径。本文采用刚体单元的离散单元法对节理岩体圆形洞室岩爆问题的数值分析, 模拟进行了初步的尝试, 取得了较有限元法更有价值的结果, 与实际情况的一致程度也较好。计算实践表明, 采用离散单元法可以完成以下工作:

- (1) 可以预测岩爆部位;
- (2) 可以确定岩爆破坏区的大致范围(只要单元足够多);

- (3) 能够仿真演示岩爆发生的全过程;
- (4) 可以提供全程变化的应力场、位移场、速度场等;
- (5) 可以大致判定岩爆烈度。

当然, 刚体离散单元法尚有许多局限性, 应注意的几个问题是:

其主要计算参数(如阻尼系数、刚度系数)的选择正确与否, 将关系到岩土问题运动过程的正确模拟及最终结果的可靠性。参数的测试结果与原状存在差异, 使参数选择遇到一定的困难。

计算时步的确定, 现在的选取原则是出于使数学方程趋于收敛的条件下确定的, 与实际问题中的“时间”概念如何联系起来, 合理地考虑时间因素, 也是今后需进一步研究的课题。

刚体单元在模拟坚硬岩石之间的作用比较适

用, 但对于软硬悬殊的岩体或颗粒体的变形模拟除显得过于简单之外, 可能计算结果与实际差距太大, 因此应考虑进一步完善变形体的离散单元法。

总之, 采用刚体离散单元法对节理发育充分、岩质坚硬的岩体进行数值分析, 模拟是切实可行的, 比用有限元方法更为方便和适用。

## 参 考 文 献

- 1 魏 群 散体单元法的基本原理数值方法及程序 北京: 科学出版社, 1991
- 2 王泳嘉, 邢纪波 离散单元法及其在岩土力学中的应用 沈阳: 东北工学院出版社, 1991
- 3 周晓青, 王元汉, 哈秋舟 离散单元法与边界单元法的外部耦合计算 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 231~235
- 4 周维垣 高等岩石力学 北京: 水利电力出版社, 1990

## ANALYSIS AND SIMULATION FOR ROCK-BURST OF CIRCULAR CAVERN WITH JOINTS BY USING DISCRETE ELEMENT METHOD

Le Xiaoyang<sup>1</sup> Than L G<sup>2</sup> Lee P K K<sup>2</sup> Tsui Y<sup>2</sup> Wang Yuanhan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

(<sup>2</sup>Rock Engineering Research Centre, Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong China)

**Abstract** The rigid discrete element method is adopted here to analyse and simulate the rock-burst process of circular cavern with joints, and to some extent the results show little difference with those of the finite element analysis and the actual situation of rock-burst. Therefore, the discrete element method is applicable to analyse and simulate the rock-burst process of circular cavern with joints.

**Key words** discrete element method, circular cavern with joints, rock-burst