

基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算

王涛^{1,3}, 盛谦², 陈晓玲³

(1. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 将直接法产生的节理网络模拟技术与三维离散元程序 3DEC 相结合, 对结构控制型的工程围岩破坏问题提供了一种实用的方法。在硬岩中的较浅的工程开挖, 岩体的破坏很大程度上是由结构面控制。因此, 对优势的节理组的正确解译非常重要。直接法节理网络模拟技术对于正确识别岩体中的块体分布非常有效, 其可以通过 3DEC 内置的 FISH 语言实现。最后给出了实例以说明求解过程与结果。

关键词: 岩石力学; 节理网络模拟; 离散单元法; 直接法; 3DEC

中图分类号: O 242.1; TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)10 - 1649 - 05

3D DISCRETE ELEMENT METHOD BASED ON DIRECT METHOD OF JOINT NETWORK SIMULATION

WANG Tao^{1,3}, SHENG Qian², CHEN Xiao-ling³

(1. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A practical method is put forward based on the direct method of joint network simulation combined with 3D discrete element program 3DEC to solve the problems of failure of structurally controlled engineering rock masses. Failure is controlled to a great extent by the presence of discontinuities in shallow excavations in hard rock, so a correct interpretation of the significant discontinuity sets is significant for analyzing stability of these excavations. The direct method of joint network simulation is efficient to identify the blocks of rock masses. It can be carried out through FISH language embedded within 3DEC. An example is presented to illustrate this procedure and the results.

Key words: rock mechanics; joint network simulation; discrete element method; direct method; 3DEC

1 引言

在岩体工程问题中, 许多参数都具有统计上的随机性。往往需要通过统计样本获得关于母体的特征, 再去模拟实际工程问题^[1]。现场量测统计过程是根据岩体结构形式推求结构面几何参数分布函数形式, 即建立结构的概率模型过程。而计算机模拟

是上述过程的逆过程, 即根据实测统计确定的结构面几何参数概率模型, 求得服从这种模型的几何图形。在计算机上生成岩体节理网络是岩体几何特征研究的基础。它不仅可以直观地反映出岩体内节理的二维或三维分布特征, 同时也是许多岩体力学分析的基础, 如结合节理张开度的模拟, 进行岩体渗透张量的计算; 推算岩体的损伤张量, 进行损伤有限元分析; 推求岩体的综合统计力学参数, 进行随

收稿日期: 2004 - 02 - 25; **修回日期:** 2004 - 04 - 05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2003CB415205)

作者简介: 王涛(1974 -), 男, 1996年毕业于华北水利水电学院岩土工程系, 现为博士研究生、讲师, 主要从事岩土工程数值模拟及 GIS 方面的教学和研究工作。E-mail: wangtao6@public.wh.hb.cn.

机有限元或随机边界元分析；进一步将节理网络图连通形成块体分析图，进行离散元分析等。地下工程实践已经揭示了工程围岩破坏基本上可以概括地分为两大类：一类是应力控制型破坏；另一类是块体控制型破坏(也称结构面控制型破坏或重力型破坏)^[2]。离散单元法计算对于处理块体控制型破坏有独特的优势，而节理网络模拟的精度直接影响其计算结果是否正确。

2 生成节理随机数的直接法

生成良好精度的节理模拟网络是节理岩体力学研究的重要保证。传统生成节理网络的计算机模拟方法的一般过程为^[3]：

- (1) 对节理样本进行统计分析，包括分组和求出各组样本中诸随机变量(迹长、走向、倾向、倾角、间距等)的样本统计值。
- (2) 进行分布拟合检验，求出各随机变量的统计分布形式。
- (3) 根据得到的统计分布形式，在计算机上生成节理随机数，并以此为依据生成节理网络。

上述方法存在两个方面的不足：

- (1) 某些节理样本可能比较分散，不能比较好地隶属于任何一组节理。统计分析中可能会剔除这些样本，造成误差。
- (2) 有些随机数不能很好地服从某些随机分布形式，以它们为依据生成随机数时，一般没有精确解，并且计算过程也很复杂，精度难以保证。

直接法可以很好地解决以上问题(图 1)。其具体过程如下^[4]：

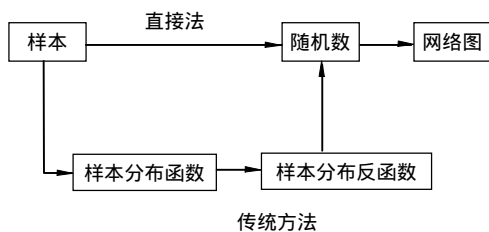


图 1 直接法和传统方法流程比较简图

Fig.1 Comparative flow diagram of direct method and traditional method

- (1) 首先，将节理按产状进行分组。
- (2) 产生随机数数库。

将样本空间分布区间 $[a, b]$ 划分为 m 个小区间(即样本点): $[a, a_1], [a_1, a_2], \dots, [a_{m-1}, b]$ 。记测量总次数(抽样数)为 n ，测量值落入第 i 个小区间

的频率为 n_i/n 。 ($1 < i < m$)。然后在样本区间 $[a, b]$ 内产生均匀分布的随机数，即

$$x_i = a + (b-a)R_i \quad (1 < i < M) \quad (1)$$

式中： R_i 为由 Monte Carlo 方法产生的均匀分布的随机数； M 为足够大正整数，由式(1)所产生的 M 个随机数构成一个随机数数库。

(3) 从随机数数库中抽取随机数。若需产生 N 个随机数，对任一随机数 $x_i(a < x_i < b)$ ，若 $a_{i-1} < x_i < a_i$ ，则将投入到小区间 $[a_{i-1}, a_i]$ ，同时该小区内随机数个数 f_i 增加一个。当该小区内随机数的频率 f_i/N 等于实际测量值落入第 i 个小区间的频率 n_i/n 时，即

$$f_i/N = n_i/n \quad (2)$$

便停止向该小区内投入随机数，转而向其他小区内投入随机数。这样，产生的随机数就与实际测量值分布相同。

(4) 根据得到的随机数绘出节理网络几何图形。

3 地下厂房洞室围岩稳定与离散单元法

地下厂房洞室围岩稳定问题的宏观分析是根据研究对象的基本条件(地质、结构几何形态、岩石力学性质和工程要求)、对潜在稳定问题的性质做出正确的宏观判断，并为具体的研究工作确定研究方法和针对性的研究手段。根据研究对象的各种条件，首先对可能存在的问题有一个判断，即判断围岩破坏是应力控制型破坏还是块体控制型破坏，然后制定相应的研究方法、内容和措施。

在地下工程开挖施工过程中，围岩应力条件和围岩岩体临空条件是不断变化的，给定位置上围岩的破坏方式也因此会发生变化，从而给具体的判断增加了难度。已有的经验和知识可以帮助人们根据围岩岩体条件和地下工程设计参数事先在宏观上估计和评价围岩潜在的问题。

有限元的理论基础是基于最小势能的变分原理，边界元法的理论基础是 Betti 互等定理，而离散元的理论基础则是最简单、最基本的牛顿第二定律。离散元法是将所研究的区域划分成一个个分立的多边形块体单元，单元与单元之间具有一定的初始接触状态，随着单元的平移和转动，调整各个单元之间的接触关系。最终，块体单元可能达到平衡状态，也可能一直运动下去。因此，离散元法适用于研究

节理系统或块体集合在准静力或动力条件下的运动问题。

离散元法的单元,从性质上分,可以是刚性的,也可以是可变形的;从形状上分,可以是任意多边形,也可以是圆形;从维数上分,可以是二维平面单元,也可以是三维立体单元。对于离散元而言,由于介质一开始就假定为离散块体的集合,块与块之间可以是角-角接触、角-边接触或边-边接触等,而且这种接触关系可以随时调整,所以单元之间没有变形协调的约束,但是平衡方程仍需要满足。

如果假定岩块为刚性的,则结构产生的总位移仅仅是由各接触点(面)的变形所引起的。块体间的相互作用关系由力和位移关系描述,对于每一接触点的作用力都被分解为法向应力和切向应力。假设在每一外力增量作用之间接触点的法向刚度和切向刚度不变,那么有

$$F_n = F_n + K_n \Delta U_n \quad (3)$$

$$F_s = F_s + K_s \Delta U_s \quad (4)$$

式中: ΔU_n 为法向变形,压缩时为正值; ΔU_s 为切向变形; K_n 为接触面法向刚度; K_s 为接触面切向刚度; F_n , F_s 分别为 2 个块体接触面的法向力和切向力^[5]。

结构面的法向应变处于弹性应变状态时应满足以下条件,否则 2 个块体将完全分离:

$$F_n \geq -R_t S \quad (5)$$

式中: R_t 为结构面抗拉强度, S 为岩块接触面积。

结构面切向应变处于弹性变形状态时则满足下述条件,否则将发生失稳剪位移:

$$|F_s| \leq |cS + F_n \tan \varphi| \quad (6)$$

式中: c 为结构面粘聚力, φ 为结构面摩擦角。

在离散单元法的大多数应用中,块体被假设为刚性,这在一些情况下是合理的,如低地应力、坚硬岩体。但在另一些情况下,块体本身的变形是不容忽视的,考虑块体变形的的方法主要有简单变形单元(simple deformation element, SDE)和完全变形单元(full deformation element, FDE)等^[6]。在 3DEC 程序中,块体在默认状态下是刚性的,用命令 GEN 使块体可以变形。

块体运动具有动能,如果一个弹性系统中有了动能,就会在平衡位置附近来回振动,而岩块在运动时并不会发生弹跳,岩块的运动是不可逆的过程。为了避免岩块在运动过程中发生振动,在离散元法

计算中采用加阻尼的办法来耗散系统在振动过程中的动能。特别是在静力问题中,必须加阻尼来吸收系统的动能,以使系统达到稳定的状态。离散元法分析的岩体失稳过程和形态是符合实际的。

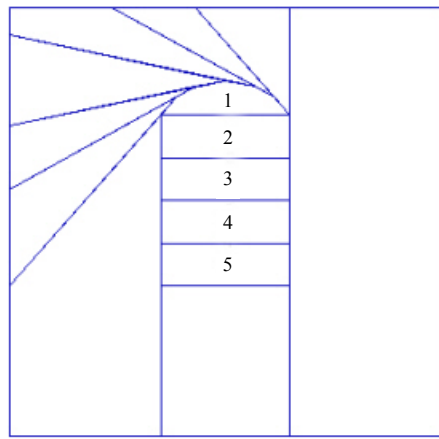
天然岩体由完整岩石和诸如断层、节理、层面等不连续面两部分组成。岩体中这些不连续面对岩体在静力和动力荷载作用下的力学行为起主导作用。在以连续介质为基础的数值模拟方法中,处理岩体中的不连续面有很大的困难。通常,像断层和层面这样的不连续面,如果它们在数量上较少,在以连续介质为基础的数值模拟中可被当作特殊的单元单独处理。例如,在有限元法中,岩体中的节理被看作特殊的单元即节理单元。在有限元与边界元耦和法中,节理被看作界面单元。在有限差分法中,岩体中的节理被看作滑移面。这些方法仅能用于节理的数量和位移量均很小的情况。离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法,该法把节理岩体看成是由离散的岩块和岩块间的节理面所组成。岩块能移动、转动和变形,而节理面可被压缩、分离或滑动。因此,岩体被看作一种不连续的离散介质。离散介质内可存在大位移、旋转、滑动乃至块体的分离,从而可以较真实地模拟岩体中的不连续面。

离散单元法和节理网络模拟为进行块体稳定分析提供了很好的基础,而 Itasca 的产品 3DEC 为两者的结合提供了很好的平台,其提供的用户接口语言(FISH language),使用户可以根据需要,自己在程序运行前设置有关变量或函数,通过其用户接口语言,参与程序的运行,获得用户需要的结果。进行三维节理网络模拟,可以根据生成随机节理随机数直接法的原理,通过 3DEC 的用户接口语言编程实现。

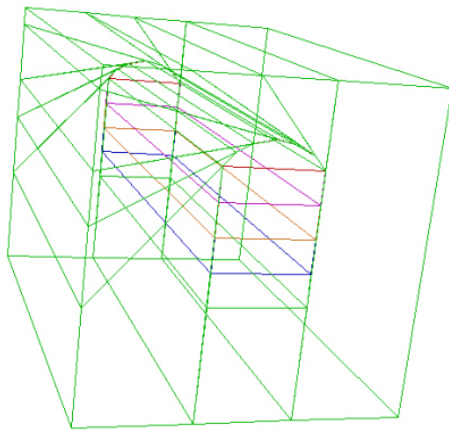
4 分析实例

展示的计算实例可以很好地说明节理网络模拟与离散单元法结合的优点。某地下洞室如图 2 所示。洞室的宽度是 6 m,从底部到顶拱的高度是 9.6 m。开挖分了 5 个开挖步。在此模拟计算中,岩石材料和节理的力学参数分别见表 1, 2。节理的剪切强度遵循库仑滑移准则。为简单起见,初始应力场为重力场。

将其围岩简化为一种岩体。在 3DEC 中,可变形岩体的弹性参数包括体积模量 K 和剪切模量 G ,



(a) 正视图



(b) 侧视图

图2 洞室布置透视图

Fig.2 Renderings of tunnel disposal

表1 岩体物理力学指标值

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

c/MPa	$\varphi(^{\circ})$	容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	G/MPa	K/MPa
1.2	50	27	20 833	27 778

表2 节理物理力学指标值

Table 2 physico-mechanical parameters of joints

类别	c/MPa	$\varphi(^{\circ})$	$K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$
J	0.2	25	10 000	2 000

其与杨氏模量 E 及泊松比 ν 的关系为

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

岩体中模拟了3组节理。节理基本要素见表3，根据前面提到的直接法的原理，利用用户接口产生随机数，并产生随机数库。控制产生节理的几何参数使其满足节理统计资料。即让程序产生的位于第 i 个区间的随机数的频率 f_i/N 与实际测量值落入第 i 个区间的频率 n_i/n 相等。模拟出的三维节理网络图如图3所示。

表3 节理要素统计结果

Table 3 Statistical results of joint elements

组号	倾向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	节理平均间距/m
J1	10~30	60~70	2.00
J2	100~120	30~40	1.50
J3	150~170	20~30	1.00

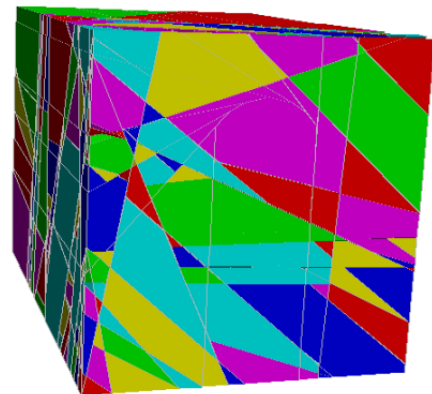


图3 施加节理网络后洞室及其围岩块体分布图

Fig.3 Block distribution of tunnel and surrounding rock after adding joint network

建立地质模型以后，共产生677个块体。由于计算要考虑到块体的应变，在3DEC中运用 GEN ED n 命令，对该模型进行网格化处理，共生成17 381个四面体网格，生成网格以后的地下洞室围岩模型如图4所示。

完全开挖后的矢量分布图如图5所示。计算过程中，通过 Hist 命令可以监测到每一步开挖时洞顶0.5 m处的位移变化情况，如图6所示。图7给出了计算过程中系统不平衡力变化特征的记录结果，其中的每一个峰值都代表了一次加载(施加初始应力和开挖)，每一次加载以后系统的不平衡力都可以降低到一个很低的水平并保持稳定，表明了模型没有出现整体失稳现象。图5、6中将各个开挖步用数字标出。减小其中一组节理的力学参数，可以使洞室边墙出现滑动块体，如图7所示。

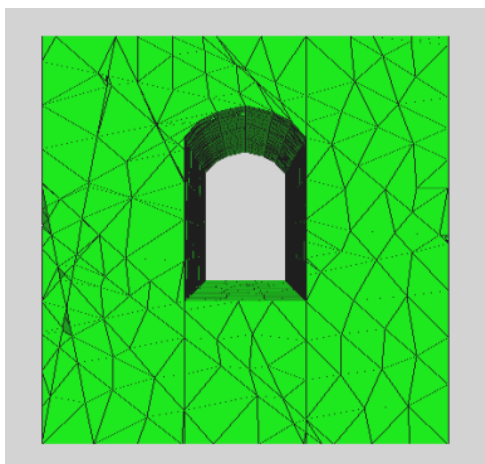


图 4 洞室及围岩计算网格图

Fig.4 Mesh of tunnel and surrounding rock

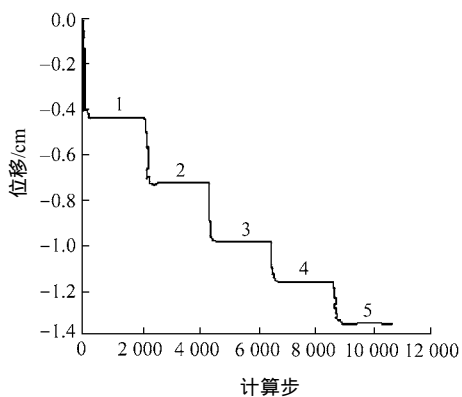


图 5 洞室上部监测到的开挖过程中的位移变化曲线

Fig.5 Displacement curve of the excavation process on the top of tunnel

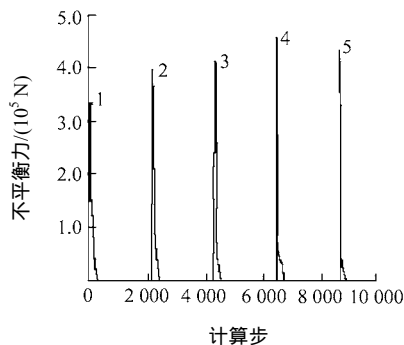


图 6 计算过程中系统不平衡力分布曲线

Fig.6 Unbalance force curve of the process of computation

5 结 论

直接法节理网络模拟方法具有简单, 精确的特点。直接法节理网络模拟与离散单元法的结合使我们能够更加充分地利用离散单元法的优点, 为块体控制类型的岩体稳定分析提供了有效的解决方法。

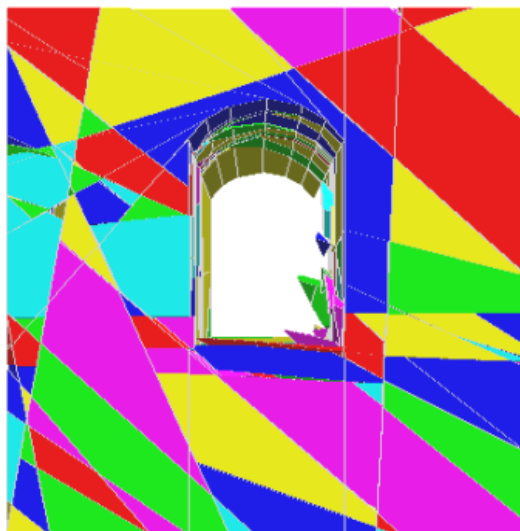


图 7 块体失稳图

Fig.7 Diagram of unstable blocks

研究表明, 3DEC 与直接法节理网络模拟相结合的方法在块体控制类型岩体稳定分析中是可行的。

参考文献(References) :

[1] Pirest S D, Hudson J A. Estimation of discontinuity spacing trace length using scanline[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1981, 18(3), 183 - 191.

[2] 朱焕春, Brummer R, Andrieux P. 节理岩体数值计算方法及其应用 (一): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 444 - 3 449.(Zhu Huanchun, Brummer R, Andrieux P. Joint rock mass numerical computation and application(1): method and discussion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 444 - 3 449.(in Chinese))

[3] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.(Wu Faquan. The Principle of Statistical Rock Mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.(in Chinese))

[4] 王 涛, 朱焕春, 李 浩, 等. 论生成节理随机数的直接法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 489 - 492.(Wang Tao, Zhu Huanchun, Li Hao, et al. Computerized direct method generating joint random number[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 489 - 492.(in Chinese))

[5] 黄运飞, 冯 静. 计算工程地质学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.(Huang Yunfei, Feng Jing. Computational Engineering Geology[M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company, 1992.(in Chinese))

[6] 李世平, 吴振业, 贺永年, 等. 岩石力学简明教程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.(Li Shiping, Wu Zhenye, He Yongnian, et al. Concise Tutorial of Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.(in Chinese))