

文章编号: 1000-7598-(2005) 12-1936-05

地下洞室群围岩稳定的离散元计算

王 涛^{1,2}, 陈晓玲², 于利宏³

(1. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;
3. 北京国电水利电力工程有限公司, 北京 100024)

摘 要: 针对水电工程中的地下洞室群围岩稳定问题, 采用三维离散元软件 3DEC, 首先对围岩可能出现的破坏类型进行了分析, 然后建立计算模型, 对随机结构面进行了模拟, 最后计算出了开挖过程中可能出现的破坏块体。使用的方法和得出的结论对类似工程具有一定的参考意义。

关 键 词: 地下洞室; 离散元; 围岩稳定; 3DEC

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Discrete element calculation of surrounding rock mass stability of underground cavern group

WANG Tao^{1,2}, CHEN Xiao-ling², YU Li-hong²

(1. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
3. Beijing Guodian Water Resources & Electric Power Engineering Co. Ltd, Beijing 100024, China)

Abstract: The stability of surrounding rock mass of underground cavern is computed by using discrete element method software 3DEC. Firstly, the destroy type of rock mass is judged; secondly, the model is built and the random discontinuities are simulated; and at last the instability blocks are discovered after computation. The method and result can give reference to the similar engineering.

Key words: underground cavern; discrete element method; stability of surrounding rock mass; 3DEC

1 引 言

目前, 水电工程中的地下洞室的规模越来越大, 地下洞室群的布局和所处的地质环境也越来越复杂。而数值计算已经普遍用于解决工程中的岩石力学问题, 从工程角度出发, 工程数值计算的关键问题之一是如何事先分析工程问题的性质, 然后合理地选择计算方法或软件进行求解。岩体是一种非线性非连续的复杂介质, 其主要特点之一是分布着大量随机的各种结构面。如果工程岩体稳定问题与岩体结构面密切相关, 采用基于连续介质理论的计算方法不能得到合理的解答, 而采用节理岩体计算方法是必需的。

近年来, 关键块分析、离散元分析以及块体稳定分析等岩体稳定分析方法都有了长足的发展, 已

成为解决岩土力学问题的重要数值方法。其中离散元方法最早由 Peter Cundall 在 20 世纪 70 年代提出, 三维离散元软件 3DEC(v3.0) 则于 2003 年面市。

2 地下厂房洞室群围岩稳定问题的宏观分析

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。通俗地讲, 就是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, 然后制定相应的研究方法、内容和措施。

地下工程实践已经揭示了工程围岩破坏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)。二者各有其发生条件。同时,两种破坏类型是具有耦合性和转化性的。应力控制破坏型围岩,可以在高应力条件下产生剪切破坏,产生的滑移线(面)组成滑移网络,从而产生新的结构面和结构体,进而会产生应力和结构面混合控制类型。

关于地应力高低的划分,目前国内外尚没有一致的界定。国内地矿、水电、交通等部门以及煤炭系统都有自己相应的划分办法。国际上较多采用的是根据地应力值与岩石或岩体强度之比来判断地应力的状态。修建在以硬岩为主的岩体地下工程,岩体初始应力水平在很大程度上决定了地下工程围岩二次应力的量级,而岩石强度和结构面发育程度在很大程度上描述了岩体的承载能力。初始应力水平、岩石强度、和结构面发育程度三者之间的关系直接影响着地下工程开挖以后围岩的稳定状态和潜在问题的性质,相对初始地应力水平,它是用初始地应力中的最大主应力与(硬岩)岩石的单轴抗压强度之比来表示,其比值小于 0.15 时,属于低地应力水平;在 0.15~0.4 之间为中等水平;高于 0.4 则是高地应力水平^[4]。在低地应力条件下,不管岩体的完整程度如何,都不会表现出应力控制型破坏。

3 离散单元法及随机节理的模拟

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被当作特殊的单元单独处理^[3]。当岩体中包含大量裂隙、节理、破碎带甚至断层等不连续结构,使得岩体既不完全连续,也不完全离散,如何合理地描述这种非连续岩体的力学行为已成为国际岩石力学界公认的理论难题。当岩体力学仅仅局限在连续介质力学体系框架内,在解释岩体断层、节理、破碎断裂、块度控制等非连续力学行为上遇到了本质的困难^[5]。因此,必须深入地研究深部岩体的自然结构特征、非连续性描述方法以及岩体的非连续力学响应,在岩体力学的研究方法和基础理论上取得突破,才能准确地描述岩体的力学行为,从而为科学地分析岩石力学工程问题提供理论基础。离散单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^[1]。

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。

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。在 3DEC 程序中,块体在默认状态下是刚性的,用命令 GEN 使块体变形。

坚硬岩石浅开挖工程的块体识别问题,在很大程度上依赖于对优势节理组的正确解译。离散单元法和节理网络模拟为我们进行块体识别和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,在程序运行前设置有关变量或函数,通过其 FISH 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 的接口用 FISH 语言编程实现^[1,2]。

3DEC 可以针对问题的性质选择 3 种求解方式:蜕化成连续力学解(类似于有限元)、完全不连续解(块体为刚体,变形产生在不连续面上)和混合不连续解(在处理连续块体内部及界面上产生应力-应变的同时,允许不连续面上产生不连续变形),大型工程问题的混合不连续解要求较高的计算机配置以及较长的计算时间。

4 工程实例分析

某水电站的扩建工程装机容量 600 MW,工程布置于右岸坝址附近,地下厂房、引水隧洞、主变室和尾水隧洞等主要建筑物位于新鲜辉绿岩岩体内。

4.1 围岩破坏的可能类型分析

水电工程选址阶段一般都尽可能避开性质特别软弱或破碎程度高的岩体,工程岩体总体上以坚硬、块状岩体为主,绝大多数岩体 RMR 值为 50~75。水电站地下工程的埋深一般不会特别大,相对于岩体承载能力而言,地应力水平以低水平占主导地位。一般地,地下工程开挖后围岩破坏将以结构面控制的块体和楔形体的滑动破坏为主,研究块体的分布及其稳定特征,将是这类工程围岩稳定研究的主要

任务。

现根据前面提出的围岩潜在破坏方式判断方法分析和宏观判断该地下厂房围岩中可能出现的围岩破坏形式和性质。辉绿岩中最大初始主应力与岩石单轴抗压强度之比低于 0.15, 在地下厂房开挖以后, 辉绿岩中围岩的潜在破坏显然属于低应力的情形。就岩体完整性而言, 它属于典型的块状岩体, 估计岩体破坏方式以块体沿结构面的滑动为主。

性质相对坚硬的辉绿岩在地下厂房洞室群围岩中占绝大多数, 根据上述分析结果, 地下厂房围岩也因此以块体破坏为主导性的潜在破坏方式。二次围岩应力对围岩稳定的影响, 将主要通过控制结构面的行为表现出来, 使得围岩破坏并不只简单地取决于潜在不稳定块体的几何形态、临空状态和块体自重。

前述分析表明, 该地下厂房洞室群在施工开挖过程中潜在的围岩稳定问题将主要取决于岩体不连续特性, 同时受围岩应力状态的影响。考虑模型处理时间、计算机容量和计算运行时间等几个方面, 实际计算中在考虑辉绿岩体稳定问题时, 认为岩体本身的变形相对结构面的变形可以忽略, 采用了 3DEC 的不连续算法, 即在模型中严格按实际统计资料模拟随机分布节理, 生成各种形态和规模的块体, 进行不连续解法运算, 研究块体的稳定性。

4.2 地下厂房 3DEC 模型

在 3DEC 中, 不连续介质被处理成离散块体的集合体, 不连续面被视为块体的界面, 不连续面可以产生滑动和张开, 块体可以产生转动变形。视问题的需要, 块体可以重新“粘结”起来成为连续体。在进行不连续问题求解时, 块体既可以处理成可变形体, 也可以处理成不可变形的刚体。在计算过程中, 程序将自动识别块体之间可能不断变化的接触状态, 这也是离散元方法与许多类似方法(如块体理论的 DDA 方法)的最大不同。

建立 3DEC 模型可以有两种途径, 一种是由整体到个别的方式: 把一个预先生成的模型块体通过反复的“切割”成需要的形状; 另一种方式是从个别到整体, 先建立各个满足要求的小模型, 然后拼装成整体模型。在实际建模中, 这两种办法可以交叉使用, 即进行半整体、半拼装式的建模, 以达到最佳效果。

3DEC 使用左手法则的坐标系统, 在本项目计算中, 计算坐标系的选择以方便建立模型为准则, 取 X 轴的正向与平面上的厂房上游侧至下游侧方向一致; Y 轴正向垂直向上, 取值与高程一致; Z 轴

沿厂房轴线方向。

在建立该地下厂房 3DEC 模型时, 采用了由整体到个别和由个别到整体的建模方式。结构面模拟和相应的处理是 3DEC 建模中的一个重要环节, 三维节理网络模型, 则利用了 3DEC 固有的节理模拟基本功能、根据生成随机节理伪随机数的原理方法、通过 3DEC 的接口用 FISH 语言编程实现。从理论上讲, 利用该方法甚至可以直接把节理编录资料逼真地移植到模型中, 即可以模拟各个具体位置上的单一节理的产状特征, 并单独地赋予该节理的物理力学特性, 这对具体化研究某个特定部位的特定工程问题非常有意义。开挖部分的厂房模型如图 1 所示, 图中用不同颜色来区分开挖步。

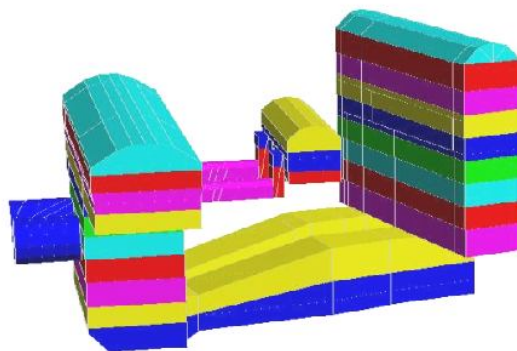


图 1 地下厂房洞室群开挖体结构 3DEC 模型

Fig.1 The 3DEC model of a excavated parts of a hydropower station

据目前水电站区域内 PD27 号平硐和一期厂坝基坑节理统计, 岩体内陡缓角节理各有 3 组发育, 因此计算中模拟的节理情况如表 1 所示。岩体中施加节理后的模型如图 2 所示。

表 1 计算中模拟的主要节理组
Table 1 Statistical results of joint elements

组号	倾向/(°)	倾角/(°)	平均间距/m
J1	10~40	20~25	5.8
J2	70~80	24~25	7.5
J3	150~170	68~75	11.1
J4	230~270	75~80	14.3
J5	290~310	72~74	16.7
J6	350~360	68~75	15.1

4.3 地下厂房区初始地应力场及岩体物理力学参数

该区水平应力大于岩体自重应力; 辉绿岩(微、新岩石)的单轴抗压强度 R_c 为 150~170 MPa,

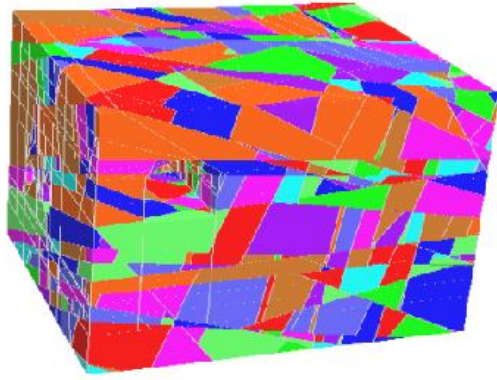


图 2 围岩节理岩体模型

Fig.2 The blocks distribution after adding the joint network

$R_c / \sigma_{\max} = 14.6 \sim 16.2$ ($\sigma_{\max}$ 为垂直洞轴线方向的最大初始应力), 属一般水平应力区。地下厂房区地表形态的变化, 也会在一定程度上影响地应力分布。在计算中采用的地应力公式为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -10.51 + 0.016y \\ \sigma_y &= -8.76 + 0.026y \\ \sigma_z &= -12.71 + 0.022y \\ \tau_{xy} &= \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0.0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 x, y, z 为 3DEC 中的计算坐标系, y 为高程 (m); $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 均为应力 (MPa)。表 2 和表 3 列示了岩体和节理的物理力学参数。

表 2 岩体物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of rockmass

弹性模量 /GPa	泊松比	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
20	0.2	30	11 111	8 333

表 3 节理物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of joints

类别	$\phi / (^{\circ})$	$K_n / \text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$	$K_s / \text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$	c / MPa
J	37	2 000	500	0.25

4.4 岩体整体稳定性的分析与判断。

利用离散元理论的特点和 3DEC 的功能, 根据系统不平衡力的大小所指示的意义分析岩体的稳定性。数值计算中每一次的循环迭代中都不可能保证每个单元、每个块体的不平衡应力或荷载都能达到平衡, 实际上也只要要求它们降低到一个足够低的水平就可以了。在考虑了离散块体的计算中, 以滑动破坏为例, 如果一个块体的滑动力不超过阻滑力时, 块体只会发生位移; 一旦滑动力超过阻滑力, 块体

就会破坏, 并产生剩余下滑力, 也就是块体的不平衡力。整个模型全部的不平衡力的总和构成了系统不平衡力, 系统总体不平衡力的一个主要来源是加载, 如施加初始应力、开挖岩体等。但如果计算中模型内很多块体发生了破坏, 系统总的不平衡力也可能相对较高; 如果模型在某次加载以后的计算过程中不断有新的破坏块体产生, 系统不平衡力就会呈现总体增加的趋势。显然, 如果在计算过程中记录系统不平衡力的变化情况, 是可以宏观上来判断岩体的整体稳定特征的。

图 3 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 (施加初始应力或者开挖), 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, 表明模型没有出现整体失稳现象。

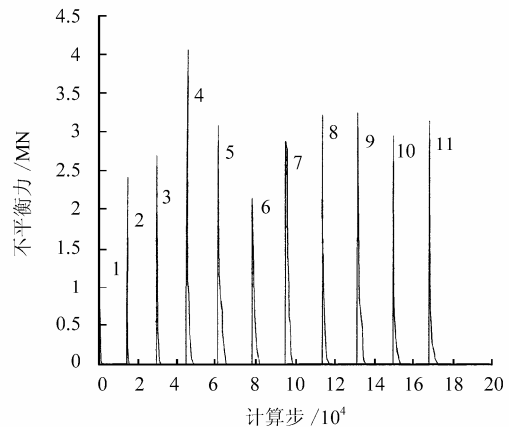


图 3 计算过程中系统不平衡力分布曲线

Fig.3 Unbalance force curve of the process of computation

4.5 不同位移块体的分布

在此基础上, 把该地下厂房洞室群围岩块体按其绝对位移总体地分成如下 4 大类: (1) 位移大于 50 mm 的不稳定块体, (2) 位移大于 40~50 mm 的潜在不稳定块体, (3) 位移在 30~40 mm 以内的明显位移块体, (4) 位移在 30 mm 以下的稳定块体。

计算结果表明, 围岩稳定的潜在问题将以地质结构面控制型破坏为主, 地下工程开挖以后围岩二次应力场状态对块体稳定的影响主要是通过改变结构面的受力状态, 从而改变其变形程度和破坏特征表现出来。

图 4 和图 5 清楚地显示不稳定和潜在不稳定块体以及明显变位块体的分布不是均匀的, 其基本分布形态并不和围岩应力场的分布形态保持某种一致性的对应性的关系, 而是明显地和岩体中的节理产

状特征保持空间方位关系上的对应性。这显示着块体的变形和失稳,更多地受到节理分布特征的制约,应力不是控制性因素。

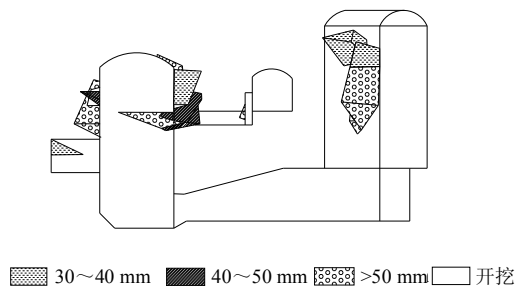


图 4 不同位移块体分布 (正视图)
Fig.4 Different displacement blocks distribution
(elevation view)

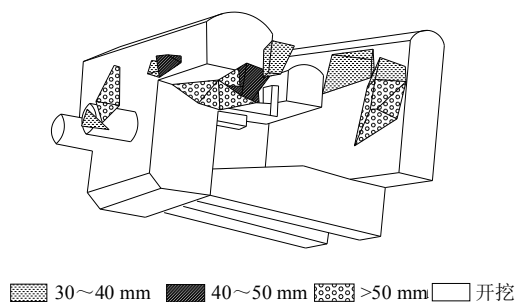


图 5 不同位移块体分布 (斜视图)
Fig.5 Different displacement blocks distribution
(oblique view)

计算结果揭示了岩体结构面特征对围岩稳定和破坏特征的控制性意义,具体地说:节理对岩体地切割对厂房和调压井上游边墙中存在的不稳定块体起到主导作用。

厂房和调压井上游边墙围岩中的松弛问题将会比较突出,该部位普遍存在显著的松弛现象,松弛范围在 10~15 m 范围内。该部位的松弛是否发展成失稳现象,与具体部位的结构面发育密度密切相关。厂房母线洞与主变室的连接部位,在约 3~5 m 的水平深度范围内,该部位出现了块体松动现象。受到不利组合节理切割形成的块体,当临空条件满足要求时,很容易出现失稳现象。但总体来说,该部位的破坏将以小型块体为主。

另外,主厂房与安装前连接处直立边墙的稳定要充分引起注意。尾水洞在施工过程中会出现小规模塌方。顶拱围岩具备良好的自稳能力,但也会出现少量的块体失稳现象,破坏块体规模一般不大。

5 结 语

根据地应力值与岩石或岩体强度之比,可以对地下洞室围岩可能破坏的方式进行判断。在此基础上,对于结构面控制类型的破坏,采用离散元软件 3DEC 计算是一种有效的方法。可以计算出开挖过程中,可能产生的破坏块体,可以回答潜在破坏发生的规模、和具体的分布特征等,并可以为工程提供加固设计等相关建议和参考依据。

参 考 文 献

- [1] 王涛,陈晓玲. 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 649—1 653.
WANG Tao, CHEN Xiao-ling. 3D discrete element method based on direct method of joint network simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 649—1 653.
- [2] 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 Huan-chun, LI Hao, et al. Computerized direct method generating joint random number[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 183—191.
- [3] Jing L. A review of techniques, advanced and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, (40): 283—353.
- [4] 朱焕春, Richard Brummer, Patrick Andrieux. 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, 22(1): 117—122.
ZHU Huan-chun, Brummer R, Andrieux P. Joint rock mass numerical computation and application(1): method and discussion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 22(1): 117—122.
- [5] 王涛,周恩华,朱焕春,等. 三峡永久船闸中隔墩岩体变形分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 683—686.
WANG Tao, ZHOU En-hua, ZHU Huan-chun, et al. Deformation analysis of middle pier in Three Gorges permanent shiplock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 683—686.