

基于 3D GIS 和 3DEC 的地下洞室围岩稳定性研究

王 涛^{1, 2}, 陈晓玲², 杨 建³

(1. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
3. 国家电力公司 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 三维地理信息系统(3D GIS)在可视化和建模方面具有独特的优势, 而三维离散元程序(3DEC)是基于离散单元方法在处理结构控制型的工程围岩破坏问题中最成熟的技术之一。借助于 3DEC 内嵌语言 FISH, 将两者的优势结合起来, 为水利水电工程中的地下洞室围岩稳定问题的咨询提供了有力的工具。

关键词: 地下工程; 三维地理信息系统(3D GIS); 离散单元法; 三维离散元程序(3DEC); 地下洞室

中图分类号: O 242.1; TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)19 - 3476 - 06

STUDY ON STABILITY OF UNDERGROUND CAVERN BASED ON 3D GIS AND 3DEC

WANG Tao^{1, 2}, CHEN Xiao-ling², YANG Jian³

(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. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, State Power Corporation of China, Chengdu 610072, China)

Abstract: Three-dimensional geographic information system(3D GIS) has special advantage in respects of visualization and constructing model; and the discrete element method program—3DEC is one of the most matured techniques to solve the problems of structurally controlled failure of engineering rock mass. With the help of FISH language, which is embedded in 3DEC, two kinds of advantage are joined together to provide a powerful tool to perform the consulting work of rock mass stability problems for underground cavern in hydropower engineering.

Key words: underground engineering; three-dimensional geographic information system(3D GIS); discrete element method; three-dimensional distinct element code (3DEC); underground cavern

1 引言

地理信息系统是以采集、储存、管理、分析和描述整个或部分地球表面(包括大气层)与空间以及地理分布有关的数据的一种特定而又十分重要的空间信息系统^[1]。

传统 GIS 起源于人们对地理学科问题的研究,

地理学与地质学相比, 前者更侧重大范围流域内或者区域内的地表问题。岩石力学则主要以地质体为研究对象, 有时要包含工程体在一起^[2]。GIS 中传统的以地理坐标为基础的强大的空间分析能力在进行岩体稳定计算时显得无优势可言。

二维 GIS 只能处理平面 x, y 轴上的信息, 不能处理铅垂方向 z 轴上的信息。在 3D GIS 中, 研究对象是通过空间 x, y, z 轴进行定义, 描述的是真 3D

收稿日期: 2005 - 06 - 24; **修回日期:** 2005 - 07 - 12

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.

的对象。随着计算机技术和GIS在许多行业诸如地质、矿山、海洋、城市地下管网、城市空间规划、城市景观分析、无线通信覆盖范围分析等方面的应用,这些行业对三维GIS的需求日益迫切。

国内外近年出现一些3DGIS与岩石力学问题结合的相关研究成果。文[3]提出了microLYNX与数值模拟软件RFPA和FLAC的耦合方法;文[4]在FLAC年会中提出了GOCAD和FLAC^{3D}结合的技术;文[5]进行了3DGIS与有限元集成的研究。

应该指出,当将GIS应用到岩石力学工程问题时,其基于地理坐标的,在分析功能上的优势将受到很大的局限性。而地下工程的空间整合分析、三维动态模拟、三维可视化与数值计算的集成等问题,已成为当前GIS的技术前沿和攻关热点。

2 离散单元法与3DEC

水利水电工程中的地下洞室,一般属于在坚硬的岩石中的浅开挖工程,岩体的破坏经常被结构面的存在所控制,比如断层,剪切带,层面和节理。这些结构面的互相切割可以产生块体,这些块体可以塌落,或者沿着开挖面滑落。在这种情况下,完整的岩石很少发生破坏,变形和破坏一般沿着单独的结构面或者面与面的交线滑动。结构面的分离以及块体的旋转,在变形和破坏的过程中依然起着重要的作用。这些开挖引起的稳定性的分析,很大程度上依赖于对优势的节理组的正确解译,还有对于开挖后,会引起的块体的出现。

离散单元法是由文[6]首先提出并应用于岩土体稳定性分析的一种数值分析方法。离散单元法允许单元发生大的平移和转动,因而能够分析岩体大变形问题。显式计算的优点使得任何复杂的本构关系都能用微小增量的方法在计算中实现,而且不存在方程无解的问题。

3DEC采用不连续力学理论的离散元方法求解,是目前解决岩土工程中不连续问题的最成熟的软件产品之一。目前,3DEC最新发布版本是3.0,软件对于识别和可视化这些块体对与分析相关的岩石力学工程稳定问题具有很强的功能,但其前后处理仍然基于命令操作且非常繁琐。借用于3DGIS的图形处理优势,可以使其前后处理过程方便而且精确。

内嵌于3DEC程序中的FISH语言是一种程序

设计语言,FISH能够使用户定义新的变量和函数。这些函数可以扩展计算程序的功能,增加用户定义的特征。

例如,新的变量可以被显示,可以开发特别的网格生成器,可以利用伺服系统做数值测试,参数的研究也可以是自动的。当用户遇到利用已有的程序结构不可能实现的功能时,FISH可以帮助用户实现。软件开发不是加入新的或者特别的特征到标准程序中,而是选择一种内嵌语言,使用户可以自己生成函数。一些有用的FISH函数已经被写好,包含在计算软件提供的库中。FISH语言的引入极大地方便了用户进行复杂的建模、计算以及二次开发等操作。它不但可以嵌入命令流文件里工作,而且还可以引用计算软件本身的任何命令,所以说它实现了对计算软件的完全控制。

3 3DGIS与3DEC的结合方法

许多地质及结构调查的结果为一系列空间分布不均的离散数据,如何用这些数据来描述地质构造的空间展布,如何再把这种空间描述变成计算机所能显示的三维图形,如何在此基础上实现人机可视化的交互分析与操作等问题,是当前3DGIS研究的重要课题。

3DGIS对于复杂的结构模型的实现主要有两种途径,一种是通过曲面拟和方法;另一种方法是体素法建模^[7]。从技术的成熟以及可操作性来分析,第1种方法要优于第2种方法,但在某些条件下,体素法建模也可以表现出很强的功能。

在曲面拟和法中,约束和插值是保证图形精确必不可少的功能,在模拟物体的几何和物理特征时,需要将节点和典型特征的信息转化为线性约束,通过插值使模型尽量光滑,同时要求严格通过线性约束来实现。采用这种方法建立的模型与3DEC结合时,可以提取相关控制点的坐标,通过3DEC的命令或者FISH生成模型。

3DGIS中的三维体元模型是随着计算机硬件发展而出现的较为新颖的三维模型表达方法,和传统的计算机图形学相比,对象体不再是面或线结构,而是以体元(volume element)为基本单元,可以用来显示物体的内部细节。对于复杂的结构模型,体元的引入会大大降低模型操作的复杂性,使一些面模型无法表达的操作得以实现^[8]。

在建模的过程中, 模型基本体元的选择是非常重要的, 对于不同的数据采集方式和不同的应用领域, 采用不同的模型会有不同的效果。在三维空间中, 四面体是一个3-单纯形(3-simplex), 空间中任意一个实体都可以由一个3-单纯复形(3-complex)来表示, 它又可以划分成相互连接但互不重叠的 k -单纯形($0 \leq k \leq 3$), 也就是说, 可以将空间的任意一个体结构划分成四面体的组合。因此, 三维体模型至少可以用四面体结构作为体元。

采用体元模型与3DEC模型结合时, 可以将3DEC中的任意形状的块体模型转化成3DGIS中的四面体组合体。图2即是从图1中的3DEC六面体Block模型转换成的6个四面体模型。

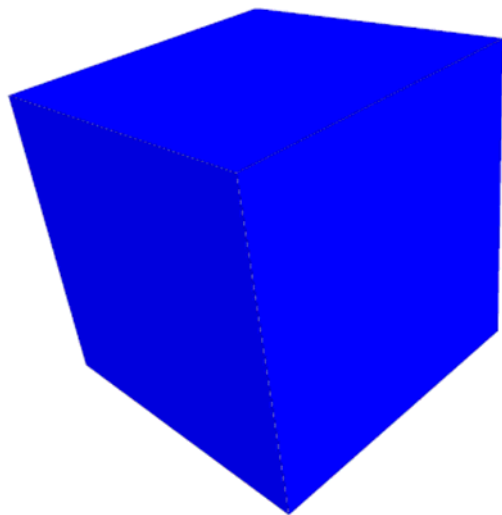


图1 3DEC中的Block模型

Fig.1 Block model in 3DEC

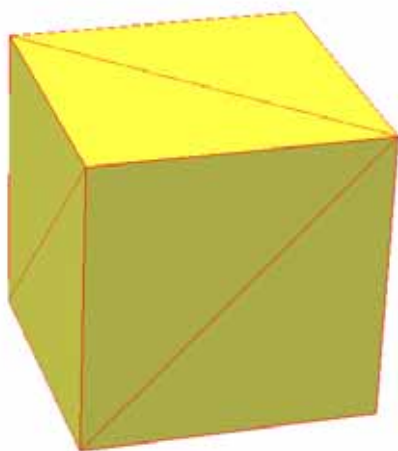


图2 3DGIS中的体元模型

Fig.2 Volume element model in 3DGIS

3DGIS与3DEC数值模拟软件结合流程如图3所示。通过3DGIS建立模型后, 可以通过转换成dxf格式, 导入CAD中, 选取在计算区域内的模型后, 可以通过2种方式建立3DEC模型, 对于复杂的模型, 可以通过提取相关控制点坐标, 生成多面体模型后, 通过FISH语言及一系列JSET和HIDE命令生成3DEC模型; 另一种方式是通过3DEC自带的前处理程序Pgen, 在CAD中可以得到模型一系列的平切剖面, Pgen可以接受这些剖面, 并生成相应的三维模型。

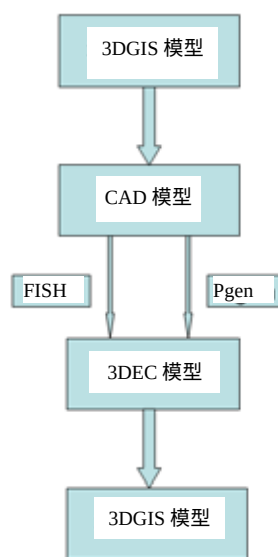


图3 3DGIS与3DEC结合的流程图

Fig.3 Flow chart of integration of 3DGIS and 3DEC

后处理过程中, 通过FISH语言按一定的要求提取3DEC中的Block模型中相应的节点信息, 在3DGIS中生成相应的体元模型。3DGIS数据库中 can 储存大量的数值计算结果, 并可以对工程关心的部位清楚地展示和查询。

4 分析实例

我国西南某大型水电站地下厂房布置于坝址右岸, 谷坡高千余米, 基岩裸露, 岩壁耸立, 呈陡缓相间的阶梯状斜坡, 河谷下游高程1 810 m以下、2 000~2 300 m为陡壁, 坡度为 $70^\circ \sim 90^\circ$, 地势险要。地下厂房区地层主要为灰黑色中厚层大理岩夹白色粗晶厚层状大理岩, 受区域地质控制, 地质呈SN方向展布。分析中对工程中结构面分布以及相关的条件进行了简化, 厂房区域的岩体与结构面力学

参数如表 1, 2 所示。

表 1 岩体物理力学指标值
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	μ
1.1	34	27.0	0.25

表 2 节理力学指标值
Table 2 Mechanical parameters of joints

c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	$K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$
1.0	30	1.0	0.5

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。根据提供的地应力测值资料, 同时考虑到地表形态的变化, 拟和出地应力的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -23.08 - 0.021z + 0.016y \\ \sigma_y &= -19.06 - 0.015z + 0.026y \\ \sigma_z &= -11.07 - 0.018z + 0.022y \\ \tau_{xy} &= \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0.0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x, z 均为 3DEC 中的计算坐标系(m); y 为高程; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 均为应力(MPa)。

借助于面与体的建模功能, 完成的水电站 3DGIS 系统如图 4 所示。在 GIS 模型中沿厂房轴向生成的剖面如图 5 所示。利用 FISH 提取 3DGIS 系统中的信息, 在 3DEC 中建立模型, 厂房开挖部分如图 6 所示。节理的生成方法同样借用 3DEC 的 FISH 完成, 具体方法在作者的其他论文中已有介绍^[9~11], 这里不再叙述, 建立的包含节理的模型如图 7 所示。

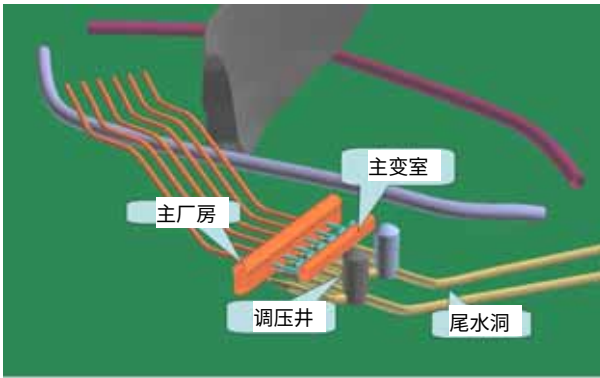


图 4 水电站布置 3DGIS 模型
Fig.4 3DGIS model of hydropower station

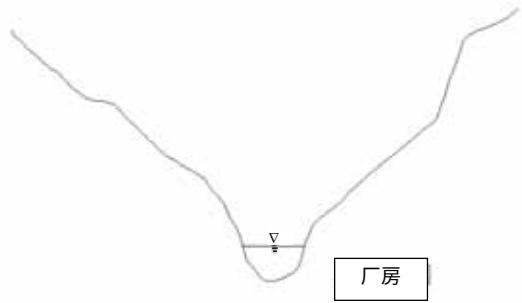


图 5 由 3DGIS 模型生成的剖面图
Fig.5 A section produced from 3DGIS model

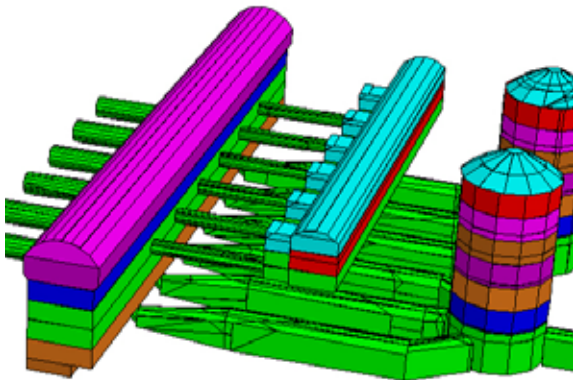


图 6 地下厂房洞室群开挖体结构 3DEC 模型
Fig.6 3DEC model of underground cavern group

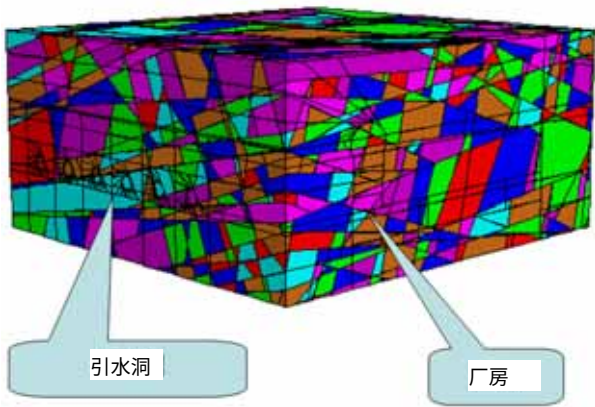


图 7 围岩节理岩体模型
Fig.7 Model of jointed rock mass

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 338 900 个四面体网格。

程序记录了计算过程中系统不平衡力变化特征(图 8), 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

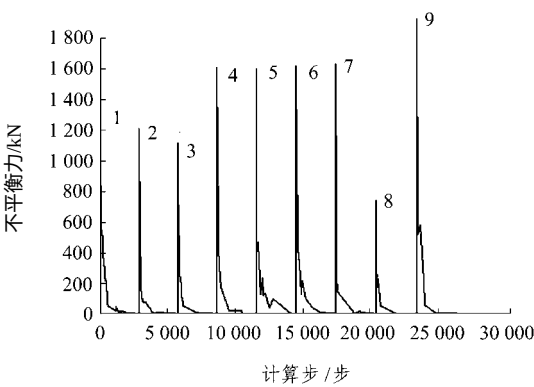


图 8 计算过程中系统不平衡力分布曲线

Fig.8 Distribution curves of unbalanced forces for the process of computation

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。

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的不平衡力变化情况，就可以在宏观上用来判断岩体的整体稳定特征。

表 3 列出了不同部位不稳定块体的分布体积。借用于 3DGIS 中的体模型技术，将厂房周围不

表 3 不稳定块体分布位置及体积	
Table 3 Locations and volumes of unstable blocks	
位置	体积/m ³
上游边墙	2 610.7
下游边墙	1 524.3
顶拱	1 134.5
主变室	1 021.3
1 [#] 调压井	261.2

稳定块体(位移大于 5 cm，体积大于 100 m³)清楚展示在图 9 中的 3DGIS 模型中。研究表明，地下厂房洞室群在施工开挖期间围岩具有良好的整体稳定性，但同时也可以出现一定范围的破坏现象。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。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，节理对岩体的切割对厂房和调压井上游边墙中存在的块体起到主导作用。

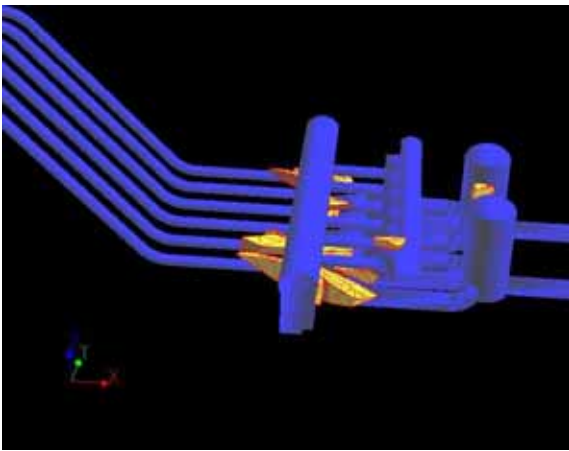


图 9 厂房周围不稳定块体分布

Fig.9 Unstable blocks distribution near the powerhouse

5 结 论

采用数值计算方法研究地下工程围岩稳定问题是国际上应用非常广泛的方法。地下工程围岩稳定问题涉及的方面很多，根据问题的性质，合理地选择数值计算方法、进行合理的运算和成果解释很重要，同时清晰而又真实地对计算结果进行显示也是数值计算工程应用过程中非常重要的环节。

通过 3DGIS 与 3DEC 的结合，使得复杂的地下工程在施工前后变形、稳定与受力状态可视化、透明化，从而为工程的决策、咨询提供有力的工具。

参考文献(References)：

[1] 龚健雅. 地理信息系统基础[M]. 北京：科学出版社，2001.(Gong Jianya. Basement of Geographic Information System[M]. Beijing：

- Science Press, 2001.(in Chinese))
- [2] 谢和平, 陈忠辉, 周宏伟, 等. 基于工程体和地质体相互作用的两体力学模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 457 - 1 464.(Xie Heping, Chen Zhonghui, Zhou Hongwei, et al. Study on two-body mechanical model based on interaction between structural body and geo-body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 457 - 1 464.(in Chinese))
- [3] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 三维地质模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388 - 392.(Hou Enke, Wu Lixin, Li Jianmin, et al. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388 - 392.(in Chinese))
- [4] Schaub P M, Ord A, German G H. Scenario Testing of Fluid-flow and Deformation During Mineralization: from Simple to Complex Geometries FLAC and Numerical Modeling in Aeromechanics[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2003. 63 - 70.
- [5] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统与有限元方法集成研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 695 - 3 699.(Wang Chunxiang, Bai Shiwei. Study on integration of 3D strata information system and FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 695 - 3 699.(in Chinese))
- [6] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[A]. In: Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics[C]. Nancy: [s. n.], 1971.
- [7] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575 - 580.(Zhong Denghua, Li Mingchao, Yang Jianmin. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 575 - 580.(in Chinese))
- [8] 张煜, 温国强, 王笑海, 等. 三维绘制技术在工程地质可视化中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 563 - 567.(Zhang Yu, Wen Guoqiang, Wang Xiaohai, et al. Application of 3D volume visualization in geology of civil engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 563 - 567.(in Chinese))
- [9] 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 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, 22(1): 117 - 122.(in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 王涛. 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. 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.(in Chinese))