

# 块状结构岩体在一般水压分布模式下的 不连续变形分析

姜清辉<sup>1,2</sup>, 周创兵<sup>2</sup>, 罗先启<sup>1</sup>, 郑宏<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**提出了三维不连续变形分析方法中地下水压力的模拟方法。并通过钻孔水位观测数据插值拟合地下水水面,建立了作用在任意形状块体单元表面上的一般水压分布模式,利用最小势能原理推导了水压力荷载对三维不连续变形分析方法总刚矩阵的贡献。地下水对滑坡稳定性影响的算例分析表明该方法是有效的。

**关键词:**岩石力学; 三维不连续变形分析方法; 一般水压分布模式; 边坡稳定性

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)03-0401-05

## THREE-DIMENSIONAL DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS ON SURFACES OF ROCK BLOCKS WITH GENERAL MODEL OF WATER PRESSURE DISTRIBUTION

JIANG Qing-hui<sup>1,2</sup>, ZHOU Chuang-bing<sup>2</sup>, LUO Xian-qi<sup>1</sup>, ZHENG Hong<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The discontinuous deformation analysis (DDA) is a powerful numerical method for the analysis of discontinuous rock mass behaviours. And the three-dimensional discontinuous deformation analysis (3D DDA) is extended to allow the consideration of groundwater pressure. In geological modelling, various geo-information can be expressed as functions of spatial variables. On the basis of groundwater observation data, a three-dimensional piezometric surface using a relevant fitting function is constructed. And a general model of water pressure distribution on the surfaces of rock blocks is established. The water pressure submatrices are then derived by minimizing the total potential energy and are added to the global matrices. The extension to 3D DDA has been incorporated into a 3D DDA computer program, and numerical results from two test cases show the reasonability of the method.

**Key words:** rock mechanics; three-dimensional discontinuous deformation analysis (3D DDA); general water pressure distribution model; slope stability

## 1 引言

自文[1]提出基于离散介质模型的离散元法 (DEM) 以来, DEM 已经发展成为岩土工程中非常具有吸引力的研究、教学和应用的工具, 其权威地位

直到 1988 年石根华提出隐式法——不连续变形分析方法 (DDA), 才受到挑战<sup>[2]</sup>。不同于 DEM 过分依赖于时间步长的显式中心差分格式, DDA 采用 Newmark 方法 ( $\beta = 1/2$ ,  $\gamma = 1$ ) 求解块体集合的运动微分方程, 其数值积分是无条件稳定的。最早提出的 DDA 方法是二维的, 但由于结构面的三维空间

**收稿日期:** 2003-07-30; **修回日期:** 2003-09-22

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目 (50239070); 湖北省防灾减灾重点实验室 (三峡大学) 开放基金资助项目 (2002ZS07)

**作者简介:** 姜清辉 (1972-), 博士, 1994 年毕业于山东科技大学采矿系安全系统工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土力学数值方法与施工仿真方面的教学和科研工作。E-mail: jqh1972@yahoo.com.cn.

特性，因此很有必要发展 3D DDA 方法<sup>[3-7]</sup>。

众所周知，除结构面外，地下水是影响岩体工程稳定性的另一个主要因素。在实际工程中，大多数岩体在不同产状、不同成因的结构面切割下具有一种块状结构，块体形状一般非常复杂，可凸可凹，且块体表面上作用的裂隙水水位是任意的。文[8]提出了三维离散元中地下水的模拟方法，把地下水水位面简化成一平面处理，这与实际工程相差较远。文[9, 10]给出了任意形状的三维块体在侧面裂隙水水位给定条件下的稳定性计算方法，但由于必须对块体侧面的水压分布作出线性假设，仍缺乏一般性。考虑到实际工程中地下水位大多通过钻孔水位观测数据获取，本文通过钻孔水位观测数据拟合地下水水位面，给出了作用在块体单元表面上的一般水压分布模式和 3D DDA 中水压力荷载子矩阵的计算方法。严格地讲，在研究地下水的作用时，应同时考虑地下水的多种作用，但由于问题的复杂性，本文在模拟地下水作用时，忽略地下水的软化作用和渗流作用，认为岩体是不透水的，只考虑静水压力作用。对渗透作用和软化作用等的考虑，还有待于进一步研究。

## 2 地下水的模拟

### 2.1 地下水水位面拟合函数

地下水水位面在空间上一般表现出极其复杂的形状，难以用简单的数学表达式来表示。研究发现，根据地下钻孔水位观测数据，可以通过相应的插值函数去逼近拟合。根据测点位移势影响场理论，地下水水位面拟合函数可表达为

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^N E_i \left( \frac{r_i^2}{R^2} \ln \frac{r_i^2}{R^2} + 1 - \frac{r_i^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

其中，

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \quad (2)$$

式中： $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N)$  为钻孔水位观测点坐标； $R$  为离散点影响半径； $E_i$  为待定系数，将已知水位观测点信息  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式(1)可得  $N$  个方程，求解联立方程组可得  $E_i$ 。

### 2.2 一般水压分布模式

根据计算机图形学，地下水水位曲面能够离散成三角形面片，如图 1 所示。其中任一三角形面片  $E'F'G'$  表示的平面方程为

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \quad (3)$$

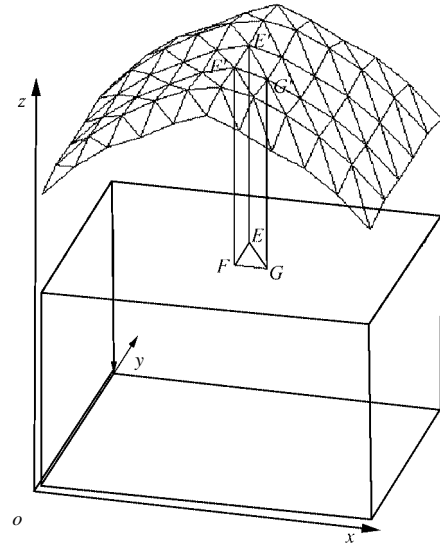


图 1 一般水压分布模式

Fig.1 A general water pressure distribution model

受水压力作用的块体表面方程为

$$A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \quad (4)$$

$A_2, B_2, C_2$  不能同时为 0，假定  $C_2 \neq 0$ ，则

$$z = -\frac{A_2}{C_2}x - \frac{B_2}{C_2}y - \frac{D_2}{C_2} \quad (5)$$

令  $\vec{n} = [n_x \ n_y \ n_z]$ ，为块体表面的单位外法线矢量， $\gamma$  为水容重，假定块体表面受水压力作用的区域为  $S$  (见图 1 中  $EFG$ )，则形成一水压力多面体  $EFG-E'F'G'$ ，在  $S$  内单位面积上所受的水压力为

$$[F_x \ F_y \ F_z]^T = (ax + by + c)[n_x \ n_y \ n_z]^T \quad (6)$$

其中，

$$a = \gamma(A_1 / C_1 - A_2 / C_2)$$

$$b = \gamma(B_1 / C_1 - B_2 / C_2)$$

$$c = \gamma(D_1 / C_1 - D_2 / C_2)$$

根据 3D DDA 的基本原理，块体表面任意点  $(x, y, z)$  的位移可由变形变量  $[D_i]$  表示，即

$$[u \ v \ w] = [T_i][D_i] \quad (7)$$

式中： $[T_i]$  为块体位移转换矩阵。

水压力荷载的势能为

$$\Pi_w = -\iint_S (F_x u + F_y v + F_z w) ds =$$

$$-\frac{1}{|n_z|} [D_i]^T \iint_{D_{xy}} [T_i]^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} dx dy \quad (8)$$

式中： $D_{xy}$  为  $S$  在平面  $xoy$  上的投影。

为获得  $\Pi_w$  的最小值，求导得

$$f_{r_i} = -\frac{\partial \Pi_w}{\partial d_{r_i}} \Big|_{[D_i]=0} \quad (r=1 \sim 12) \quad (9)$$

从而构成  $12 \times 1$  阶子矩阵, 将其加到 3D DDA 总体平衡方程的荷载列阵中, 得

$$\frac{1}{|n_z|} \iint_{D_{xy}} [T_i]^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} dx dy \rightarrow [F_i] \quad (10)$$

引入下列在块体表面区域  $S$  投影  $D_{xy}$  上的基本积分, 其解析表达式可由单纯形积分获得<sup>[2]</sup>

$$S^1 = \iint_{D_{xy}} 1 dx dy, \quad S_x^1 = \iint_{D_{xy}} x dx dy, \quad S_y^1 = \iint_{D_{xy}} y dx dy,$$

$$S_{xx}^1 = \iint_{D_{xy}} x^2 dx dy, \quad S_{yy}^1 = \iint_{D_{xy}} y^2 dx dy, \quad S_{xy}^1 = \iint_{D_{xy}} xy dx dy.$$

令

$$\left. \begin{aligned} [a_1] &= [0 \quad 0 \quad n_x]^T [a \quad b \quad c] \\ [a_2] &= [0 \quad 0 \quad n_y]^T [a \quad b \quad c] \\ [a_3] &= [0 \quad 0 \quad n_z]^T [a \quad b \quad c] \\ [a_4] &= (-n_y[Z_0] + n_z[Y_0])[a \quad b \quad c] \\ [a_5] &= (n_x[Z_0] - n_z[X_0])[a \quad b \quad c] \\ [a_6] &= (-n_x[Y_0] + n_y[X_0])[a \quad b \quad c] \\ [a_7] &= n_x[X_0][a \quad b \quad c] \\ [a_8] &= n_y[Y_0][a \quad b \quad c] \\ [a_9] &= n_z[Z_0][a \quad b \quad c] \\ [a_{10}] &= \left( \frac{1}{2} n_x[Y_0] + \frac{1}{2} n_y[X_0] \right) [a \quad b \quad c] \\ [a_{11}] &= \left( \frac{1}{2} n_y[Z_0] + \frac{1}{2} n_z[Y_0] \right) [a \quad b \quad c] \\ [a_{12}] &= \left( \frac{1}{2} n_x[Z_0] + \frac{1}{2} n_z[X_0] \right) [a \quad b \quad c] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中,

$$[X_0] = [1 \quad 0 \quad -x_0]^T \quad [Y_0] = [0 \quad 1 \quad -y_0]^T \\ [Z_0] = [-A_2/C_2 \quad -B_2/C_2 \quad -(D_2/C_2 + z_0)]^T$$

此处  $(x_0, y_0, z_0)$  为块体质心坐标。令

$$[a_r] = \begin{bmatrix} a_{11}^r & a_{12}^r & a_{13}^r \\ a_{21}^r & a_{22}^r & a_{23}^r \\ a_{31}^r & a_{32}^r & a_{33}^r \end{bmatrix} \quad (r = 1 \sim 12) \quad (12)$$

则水压力矩阵积分解析式为

$$f_{ni} = [a_{11}^r S_{xx}^1 + a_{22}^r S_{yy}^1 + (a_{12}^r + a_{21}^r) S_{xy}^1 + (a_{13}^r + a_{31}^r) S_x^1 + (a_{23}^r + a_{32}^r) S_y^1 + a_{33}^r S^1] / |n_z| \quad (13)$$

假定  $A_2 \neq 0$ , 水压力矩阵积分解析式为

$$f_{ni} = [a_{11}^r S_{yy}^2 + a_{22}^r S_{zz}^2 + (a_{12}^r + a_{21}^r) S_{yz}^2 + (a_{13}^r + a_{31}^r) S_y^2 + (a_{23}^r + a_{32}^r) S_z^2 + a_{33}^r S^2] / |n_x| \quad (14)$$

其中,

$$S^2 = \iint_{D_{yz}} 1 dy dz \\ S_y^2 = \iint_{D_{yz}} y dy dz \\ S_z^2 = \iint_{D_{yz}} z dy dz \\ S_{yy}^2 = \iint_{D_{yz}} y^2 dy dz \\ S_{zz}^2 = \iint_{D_{yz}} z^2 dy dz \\ S_{yz}^2 = \iint_{D_{yz}} yz dy dz$$

$D_{yz}$  为  $S$  在平面  $yo z$  上的投影, 矩阵  $[a_r] (r = 1 \sim$

12) 和式(12)具有相同的形式。其中,

$$a = \gamma(A_2 B_1 - A_1 B_2) / A_2 C_1$$

$$b = \gamma(A_2 C_1 - A_1 C_2) / A_2 C_1$$

$$c = \gamma(A_2 D_1 - A_1 D_2) / A_2 C_1$$

$$[X_0] = [-B_2/A_2 \quad -C_2/A_2 \quad -(D_2/A_2 + x_0)]^T$$

$$[Y_0] = [1 \quad 0 \quad -y_0]^T$$

$$[Z_0] = [0 \quad 1 \quad -z_0]^T$$

假定  $B_2 \neq 0$ , 水压力矩阵积分有如下解析式:

$$f_{ni} = [a_{11}^r S_{xx}^3 + a_{22}^r S_{zz}^3 + (a_{12}^r + a_{21}^r) S_{xz}^3 + (a_{13}^r + a_{31}^r) S_x^3 + (a_{23}^r + a_{32}^r) S_z^3 + a_{33}^r S^3] / |n_y| \quad (15)$$

其中,

$$S^3 = \iint_{D_{xz}} 1 dx dz$$

$$S_x^3 = \iint_{D_{xz}} x dx dz$$

$$S_z^3 = \iint_{D_{xz}} z dx dz$$

$$S_{xx}^3 = \iint_{D_{xz}} x^2 dx dz$$

$$S_{zz}^3 = \iint_{D_{xz}} z^2 dx dz$$

$$S_{xz}^3 = \iint_{D_{xz}} xz dx dz$$

$D_{xz}$  为  $S$  在平面  $xoz$  上的投影, 矩阵  $[a_r] (r = 1 \sim$

$$a = \gamma(A_1 B_2 - A_2 B_1) / B_2 C_1$$

$$b = \gamma(B_2 C_1 - B_1 C_2) / B_2 C_1$$

$$c = \gamma(B_2 D_1 - B_1 D_2) / B_2 C_1$$

$$[Y_0] = [-A_2/B_2 \quad -C_2/B_2 \quad -(D_2/B_2 + y_0)]^T$$

$$[X_0] = [1 \quad 0 \quad -x_0]^T$$

$$[Z_0] = [0 \quad 1 \quad -z_0]^T$$

### 3 地下水对岩体边坡稳定性的影响

#### 3.1 块体沿平面滑动

如图 2 所示, 本例的岩体边坡由 3 个岩块组成, 在边坡的底部边界和左边界施加其相应法向固定约束, 其他边界自由。岩石的材料常数为: 弹性模量  $E = 1 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 容重  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ 。边坡滑面为一平面, 滑面倾角为  $21^\circ$ , 将滑面摩擦角设置成倾角的 1.2 倍, 并忽略滑面上的粘聚力, 在仅考虑自重的作用下计算了 500 时步。图 3 所示为 3D DDA 的计算结果。由图 3 可知, 滑面上部块体没有相对滑动, 由于滑面倾角小于摩擦角, 滑面切向接触力(下滑力)小于抗滑力, 边坡处于稳定状态。在同样的计算条件下, 考虑地下水压力的作用, 图 4 所示为 500 时步 3D DDA 的计算结果。计算结

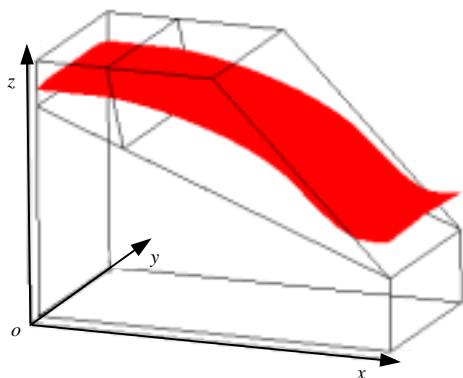


图 2 岩体边坡模型和地下水位面

Fig.2 Three-blocks rock slope system and piezometric surface

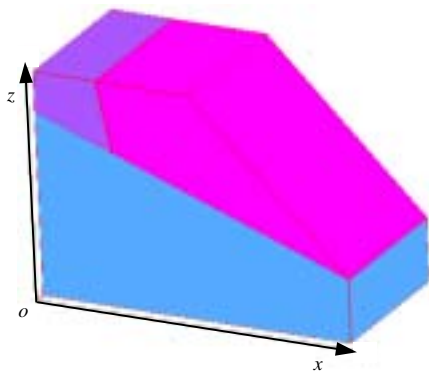


图 3 3D DDA 的计算结果(不考虑地下水压力)

Fig.3 3D DDA results for three-blocks slope without piezometric surface

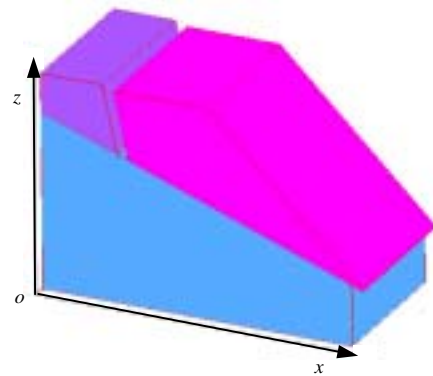


图 4 3D DDA 的计算结果(考虑地下水压力)

Fig.4 3D DDA results for three-blocks slope with piezometric surface

果表明, 上部块体在地下水和重力作用下产生了明显滑动。图 5 所示为 2 种工况条件下滑面接触力与时步的关系曲线, 在地下水压力作用下, 由于滑面法向接触力的减少, 滑面抗滑力小于切向接触力, 滑面接触点对的接触状态表现为滑动态, 亦即地下水诱发了滑坡。

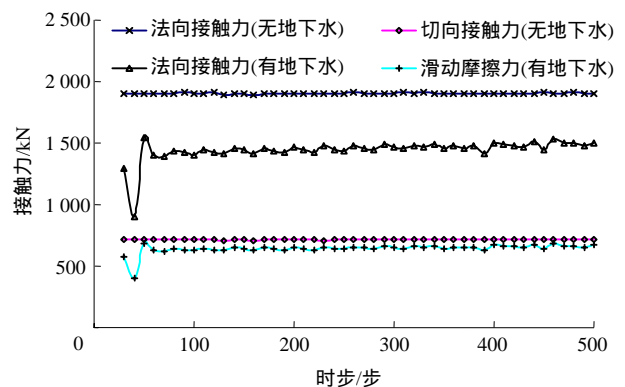


图 5 滑面接触力时程曲线

Fig.5 Contact force distribution with time steps

#### 3.2 块体沿圆弧面滑动

如图 6 所示, 本例是一个富含节理的岩体边坡, 在边坡的底部边界和左边界施加其相应法向固定约束, 其他边界自由。岩石的材料常数为: 弹性模量  $E = 1 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 容重  $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$ ; 节理面的材料常数为: 内摩擦角  $\varphi = 60^\circ$ , 粘聚力  $c = 0 \text{ MPa}$ 。荷载为块体自重和地下水压力, 水位面为一曲面, 由钻孔水位观测数据插值拟合形成(见图 6), 图 7 所示为 1 000 时步 3D DDA 的计算结果, 由图 7 可知, 边坡在地下水和自重作用下沿着一已知圆弧形滑面产生滑动, 由于受不同倾向和倾角节理面的影响, 不稳定块体的滑坡运动表现出更为复杂的破坏形式。

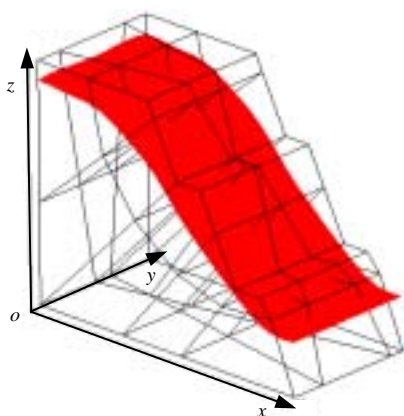


图 6 节理岩体边坡和地下水位面

Fig.6 Rock slope model with circular sliding surface and piezometric surface

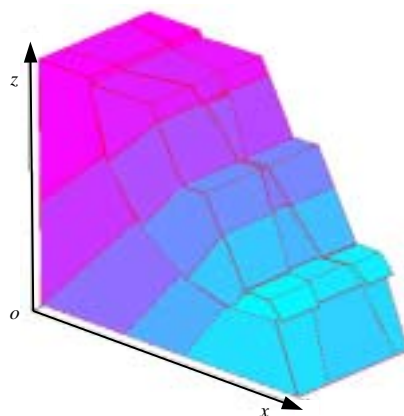


图 7 3D DDA 的计算结果

Fig.7 3D DDA results for rock slope model with circular sliding surface and piezometric surface

## 4 结 论

本文建立了作用在任意形状块体单元表面上的一般水压分布模式, 得出了 3D DDA 中地下水压力的模拟方法, 并将其应用到地下水对滑坡的稳定性影响分析, 算例表明了该方法的有效性。

### 参考文献(References) :

- [1] Cundall P.A. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems[A]. In : Proc. Int. Symp. Rock Fractures[C]. Nancy : [s. n.], 1971.
- [2] Shi Genhua. Discontinuous deformation analysis-a new numerical model for the static and dynamics of block system.[Ph. D. Thesis][D].

Berkeley : University of California, 1988.

- [3] Shi G.H. Theory and examples of three dimensional discontinuous deformation analyses[A]. In : Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Asian Rock Mechanics Symposium[C]. Beijing, [s. n.], 2001. 27-32.
- [4] 姜清辉, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法中角-面接触模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 930-935.(Jiang Qinghui, Feng Dingxiang. Study on an angle-face model of three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 930-935.(in Chinese))
- [5] 姜清辉, 朱传云, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法的变分原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增): 2090-2093.(Jiang Qinghui, Zhu Chuanyun, Feng Dingxiang. The variational principle and application of three-dimensional discontinuous deformation analysis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.): 2090-2093.(in Chinese))
- [6] 姜清辉, 杨文柱, 丰定祥. 三维块体系统非连续变形正分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1765-1769.(Jiang Qinghui, Yang Wenzhu, Feng Dingxiang. Three-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1765-1769.(in Chinese))
- [7] 姜清辉, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法中的锚杆模拟[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 176-178.(Jiang Qinghui, Feng Dingxiang. Modeling of rockbolts in three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 176-178.(in Chinese))
- [8] 焦玉勇, 葛修润, 谷先荣. 三维离散元法中地下水及锚杆的模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 6-11.(Jiao Yuyong, Ge Xiurun, Gu Xianrong. Modelling of groundwater and rock bolts in 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 6-11.(in Chinese))
- [9] 邬爱清, 朱虹, 李信广. 一种考虑块体侧面一般水压分布模式下的块体稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 19(增): 936-940.(Wu Aiqing, Zhu Hong, Li Xinguang. A method for block stability analysis considering a general water pressure distribution model acting on the block surfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 936-940.(in Chinese))
- [10] 许强, 黄润秋, 巨能攀等. 边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 408-413.(Xu Qiang, Huang Runqiu, Ju Nengpan, et al. Development and study of stability analysis system of slope blocks[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 408-413.(in Chinese))