

DOI: 10.11779/CJGE20230826

隧道围岩最大可移动块体求解及其应用

张敏思^{1,2}, 杨勇^{1,2}, 王述红^{*2}, 查文华¹

(1. 东华理工大学江西省地质环境与地下空间工程研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 由于结构面的隐蔽性, 目前的勘察技术无法精确获取每条结构面的定位及力学参数, 仅能根据出露情况获取产状信息。而结构面的定位是求解块体的关键因素, 因此有必要考虑不同定位情况下结构面与开挖面的所有组合, 并找到最不利情况, 为工程开挖提供预测及评价。在构建节理锥的基础上, 提出了一种投影平移法, 实现了任意柱状开挖面上最大可移动区域的求解。在此基础上, 采用离散-切割-组合方法重构了曲面块体。首先, 设置一组放射状虚拟结构面对锥形块体进行切割, 完成块体的单元离散; 其次, 在面单元分类的基础上提出了曲面切割单元的详细算法。最后对切割后的单元进行分类组合, 实现了曲面块体的重构。基于 VC++ 和 OpenGL 开发了三维可视化程序, 通过算例和工程实例验证了算法的精度、适用性及鲁棒性。最大可移动块体程序可用于隧道走向的选择, 为工程设计提供依据。

关键词: 块体理论; 最大关键块体; 隧道工程; 节理岩体

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)11-2314-09

作者简介: 张敏思(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非连续岩体力学方面的教学研究工作。E-mail: mscccathy@163.com。

Solutions and applications of maximum movable block in surrounding rock of tunnels

ZHANG Minsi^{1,2}, YANG Yong^{1,2}, WANG Shuhong², ZHA Wenhua¹

(1. Engineering Research Center for Geological Environment and Underground Space of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Due to the concealment of the discontinuities, the current exploration technology can not accurately obtain the location and mechanical parameters of all discontinuous, but can only obtain the occurrence information according to the exposure situation. The location of the discontinuities is a key factor for generating a block, so it is necessary to consider all the combinations of the discontinuities and excavation surface, and find the most unfavorable conditions to provide prediction and evaluation for engineering excavation. Based on the construction of joint pyramids, a projection translation method is proposed to solve the maximum movable region for cylindrical excavation surfaces. The dispersing-cutting-assembling method is used to reconstruct the curve surface block. Firstly, a set of radial virtual structures are set up to cut the pyramid block to realize the dispersion of the block. Secondly, based on the classification of face elements, a detailed surface-cutting-element algorithm is proposed. Finally, the cut elements are classified and combined to realize the reconstruction of the curve surface block. A 3D visualization program is developed based on the VC++ and OpenGL. The accuracy, applicability and robustness of the algorithm are verified by a numerical example and an engineering example. The maximum movable block program can be used to select the tunnel direction, providing reference for engineering design.

Key words: block theory; maximum key block; tunnel engineering; joint rock mass

0 引言

岩体中结构面相互交错形成了复杂的块体系统, 地下工程的开挖将会破坏原有系统的平衡, 出现块体掉落或滑移现象, 导致工程事故发生。这些不稳定的块体被称为关键块体。块体理论自正式提出以来, 一直受到广泛关注。随着块体理论的发展, 许多学者将其应用于岩体工程的各个领域, 并取得了满意的效果。

对于块体理论的研究, 最早由 Goodman 等^[1]提出, 之

基金项目: 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20212BCJ23003); 江西省地质环境与地下空间工程研究中心开放基金资助项目(JXDHJJ2022-006); 国家自然科学基金项目(52264003, 51964002); 江西省“双千计划”人才资助项目(DHSQT22021002)

收稿日期: 2023-08-28

*通信作者 (E-mail: shwang@mail.neu.edu.cn)

后由 Priest^[2]、Delport 等^[3]和 Lin 等^[4]进行了发展和补充, 形成了不同的研究方向, 提出了多种研究方法。不同的方法适用于不同的情况, 但其本质是结构面的空间位置是否固定, 由此分为定位结构面间确定性块体的识别和不定位结构面间潜在最大关键块体求解。

定位结构面间的块体识别指的是已知结构面和开挖面的参数识别出区域内的所有块体, 从而确定开挖面上的关键块体。对此类研究目前存在方法: ①基于交线回路的拓扑分析方法^[1-4]; ②基于平面对凸多面体切割算法而提出的组合方法^[5-8]。然而在工程设计阶段, 由于勘察技术及经济条件的限制, 所获取的岩体内部结构面信息有限, 仅能根据出露面信息获取其分组和产状信息。因此有必要考虑结构面和开挖面间所有的组合, 并找到最不利情况, 为工程开挖提供预测及评价, 这在工程设计中具有重要意义。最大关键块体的概念最早由石根华提出, 并通过向量法确定了块体的有限性和可动性, 但由于当时计算机及三维可视化技术的限制, 此方法并不便于应用和理解。为此, 石根华提出了赤平投影方法, 通过图形清晰展示了块体的有限性和可动性。然而, 做图方法工作量大, 精度有限。随着计算机技术的发展, 张子新等^[9]在此基础上提出了赤平解析法, 将投影图用数学解析式表达, 通过构建位置参量矩阵来判断块体的有限性和可移动性。赤平解析法是赤平投影法的发展和延伸, 吸收了向量方法和做图方法的优点, 但在计算位置参量时, 需获取块体对应区域内的一点, 这是解析法无法实现的, 因此需要在赤平投影内采点试算, 当代表块体的投影区较小时可能出现误差, 需提高采点数量来弥补。本文在向量方法的基础上, 提出了无效节理锥的删除方法, 便于程序开发, 且无精度问题。在应用方面, 张奇华等^[10]将最大块体用于地下厂房稳定性评估中; 杨勇等^[11]通过投影相切法对单一曲线开挖面进行了最大块体求解, 并将其应用于隧道工程中。然而, 对于多曲线开挖面上最大块体的求解方法却鲜有报道。另外在隧道工程中, 关键块体的临空面均为曲面, 计算机图形学中对于曲面的处理方式较多。在块体识别的文献中, 石根华采用多平面替代开挖面; Elmouttie 等^[12]提出了一种由面单元组成的多面体开挖模型, 可以描述曲面开挖; Li 等^[13]和 Liu 等^[14]使用了解析表达式来描述曲面。然而在计算机图形学中, 对元素的表达应简单化、单元化, 这有利于程序开发和算法统一。

鉴于此, 本文针对柱状开挖面的隧道工程, 提出了一种投影平移方法, 将复杂的空间问题转化为简单的平面问题, 实现了最大可移动块体的快速求解。在此基础上, 采用离散-切割-组合方法完成了曲面块体

的精细化构建。数据格式统一且简洁, 易于存储和程序开发。基于此开发的三维可视化程序显示出算法具有良好的精度与鲁棒性。

1 最大可移动区域的确定

本文将勘察中易于获取的结构面产状视为已知, 考虑结构面定位的随意性求解出潜在最大块体。在实际工程中存在 3 组和 4 组结构面的情况较为多见, 实际上多于 4 组结构面所形成的最大块体体积均不会超过 3 组或者 4 组所形成的最大块体体积。因此本文以四组结构面岩体为研究对象, 进行了潜在最大可移动块体的求解与构建。最大可移动块体是由节理锥与开挖面围限而成, 因此本文针对节理锥的构建、定位以及曲面块体的重构 3 个方面进行详细阐述。

1.1 节理锥的构建

本文采用 Goodman 等^[1]提出的向量法构建节理锥。在含四组结构面的岩体工程中, 以四面体和五面体为主。四面体是由其中 3 组结构面与开挖面形成的, 而五面体是由四组结构面与开挖面形成的。4 组结构面分别为 F1, F2, F3 和 F4, 那么可能存在 5 种组合情况, 分别为 F1-F2-F3-F4, F1-F2-F3, F1-F2-F4, F1-F3-F4 和 F2-F3-F4。因此在确定最大可移动块体时, 应综合考虑 3 组及 4 组结构面参与形成的节理锥。

节理锥 (JP) 是在结构面通过同一点条件下之间的交线组合而成。以交点为起点, 在空间中每条交线存在两个方向, 因此在不同结构面之间可以形成多种节理锥。本文采用向量法实现不同节理锥的构建。以每组结构面参数的均值为代表, 则结构面法向量为

$$\mathbf{n}_i = (\sin \alpha_i \sin \beta_i, \cos \alpha_i \sin \beta_i, \cos \beta_i) \quad (1)$$

式中: α_i , β_i 为第 i 组结构面平均倾向和倾角; i 为结构面组号。

(1) 节理锥构建方法

构造 $C_m^2 \times m$ 阶矩阵 \mathbf{M} , 其中 m 为参与构建节理锥的结构面组数量。当 $m=4$ 时, \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1^{12} & M_2^{12} & M_3^{12} & M_4^{12} \\ M_1^{13} & M_2^{13} & M_3^{13} & M_4^{13} \\ M_1^{14} & M_2^{14} & M_3^{14} & M_4^{14} \\ M_1^{23} & M_2^{23} & M_3^{23} & M_4^{23} \\ M_1^{24} & M_2^{24} & M_3^{24} & M_4^{24} \\ M_1^{34} & M_2^{34} & M_3^{34} & M_4^{34} \end{pmatrix} \quad (2)$$

当 $m=3$ 时, \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1^{12} & M_2^{12} & M_3^{12} \\ M_1^{13} & M_2^{13} & M_3^{13} \\ M_1^{23} & M_2^{23} & M_3^{23} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$M_k^{\bar{i}} = \text{sgn}(\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{n}_k) \quad \text{。} \quad (4)$$

将节理锥 JP_r 表示为 $JP(a_1 a_2 \dots a_m)$, 其中 r 为节理锥的编号, $r=1, 2, \dots, 2^m$; a_i 为节理锥的位置参数; $a_i=0$ 表示节理锥位于第 i 条结构面的上方, $a_i=1$ 表示节理锥位于第 i 条结构面的下方。

按下式构造 $m \times m$ 阶对角矩阵:

$$\mathbf{G}_{JP(a_1 a_2 \dots a_m)} = \text{diag}(-2a_1 + 1, -2a_2 + 1, \dots, -2a_m + 1) \quad \text{。} \quad (5)$$

令矩阵

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{M} \mathbf{G}_{JP(a_1 a_2 \dots a_m)} = (b_{rst}) \quad \text{。} \quad (6)$$

式中: \mathbf{B}_r 为 $C_m^2 \times m$ 阶矩阵, 其中 $s=1, 2, \dots, C_m^2$; $t=1, 2, \dots, m$; 则 JP_r 的棱线方向参数矩阵可表示为

$$\mathbf{E}_r = \text{diag}(e_{r1}, e_{r2}, \dots, e_{rn}) \quad \text{。} \quad (7)$$

式中: $N = C_m^2$; e_{rs} 为 \mathbf{B}_r 矩阵中第 s 行元素的最大值与最小值之和。4 条结构面构建节理锥时, 结构面之间存在六条交线, 其方向向量可以用 \mathbf{N} 表示为

$$\mathbf{N} = (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_4, \mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_4, \mathbf{n}_3 \times \mathbf{n}_4)^T \quad \text{。} \quad (8)$$

3 条结构面构建节理锥时, 结构面之间存在 3 条交线, 其方向向量可以用 \mathbf{N} 表示为

$$\mathbf{N} = (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_3)^T \quad \text{。} \quad (9)$$

则得到节理锥 JP_r 棱线向量集的表达式为

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{E}_r \mathbf{N} \quad \text{。} \quad (10)$$

(2) 删除无效节理锥

\mathbf{V}_r 中的 0 向量代表此条交线不参与节理锥的构建, 若非零向量的数量小于 3 则表示此节理锥为有限节理锥, 无法与开挖面形成块体。将节理锥的所有棱线向隧道断面所在平面投影, 若存在这样一条棱线, 使得其余所有棱线的投影均位于其所在投影直线的一侧, 则此节理锥可以与隧道开挖面形成块体, 否则无法形成块体, 为无效节理锥。如图 1 所示, 图 1 (a) 中所有棱线均位于红色虚线一侧, 此为有效节理锥。而图 1 (b) 棱线投影均位于各虚线两侧, 则此节理锥无法与开挖面形成块体, 为无效节理锥。

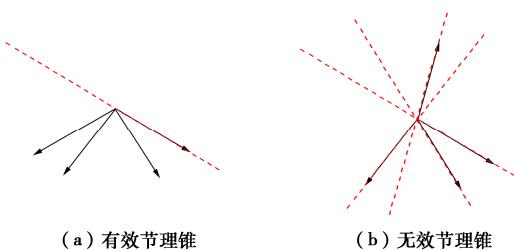


图 1 节理锥有效性判断

Fig. 1 Validity judgment of joint pyramids

1.2 投影平移法确定最大可移动区域

在三维坐标系中, Y 轴为隧道走向, Z 轴竖直向上。形成最大块体时, 开挖面与 JP 的边部棱线相切。最大块体的顶点是 4 条棱线的交点, 即 4 条结构面的

交点。当开挖面由单一曲线表示时, 那么很容易通过相切条件确定棱线定位, 但开挖面由多条曲线组合而成时, 首先应判断边缘棱线与哪条曲线相切, 之后才能进行定位。本文提出了一种边缘棱线与任意开挖曲面相切的定位方法, 适用于任何凸开挖面。

将节理锥的棱线向 XOZ 平面投影, 通过最大夹角可以确定节理锥的边缘棱线。开挖面在 XOZ 平面上的投影由 n 条曲线组成, 将曲线顺时针编号, 令曲线 Π_j 的表达式为

$$\Pi_j: f_j(x, z) = 0 \quad \text{。} \quad (11)$$

如图 2 所示, 曲线 Π_j 与 Π_{j+1} 相交于点 H_j , 其坐标为 (x_j, z_j) , 其中 $j=1, 2, \dots, n$ 。当 $j=1$ 时, 下标 $j-1$ 被 n 取代。当 $j=n$ 时, 下标 $j+1$ 被 1 取代, 若坐标系原点在开挖曲线内, 则编号为 j 的曲线上 (x, z) 点处的单位外法向量为

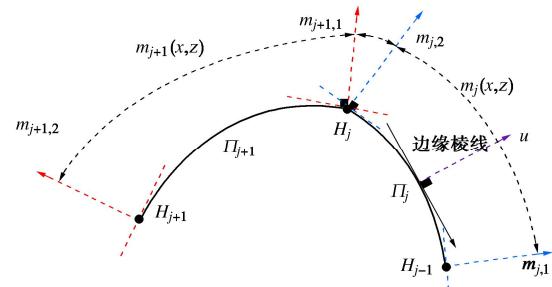


图 2 切点的确定

Fig. 2 Determination of tangential points

$$\mathbf{m}_j(x, z) = \frac{\text{sgn}(F) \cdot \left(\frac{\partial f_j(x, z)}{\partial x}, \frac{\partial f_j(x, z)}{\partial z} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_j(x, z)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_j(x, z)}{\partial z} \right)^2}} \quad \text{。} \quad (12)$$

式中: F 为向量的方向判别式,

$$F = \frac{\partial f_j(x, z)}{\partial x} \cdot x + \frac{\partial f_j(x, z)}{\partial z} \cdot z \quad \text{。} \quad (13)$$

那么曲线 Π_j 两端点处的单位外法线向量分别为

$$\mathbf{m}_{j,1} = \mathbf{m}_j(x_{j-1}, z_{j-1}) \quad , \quad (14)$$

$$\mathbf{m}_{j,2} = \mathbf{m}_j(x_j, z_j) \quad 。 \quad (15)$$

由式 (14), (15) 可知, 曲线在交点 H_j 处的法向量会发生突变, 从 $\mathbf{m}_{j,2}$ 变为 $\mathbf{m}_{j+1,1}$ 。 n 段曲线间存在 n 个交点, 那么 $2n$ 个向量将 XOZ 平面划分为 $2n$ 个区域。假设 \mathbf{u} 是节理锥边缘棱线投影的单位外法向量, 它指向节理锥投影的外部。若节理锥内侧任一棱线的投影为 \mathbf{e} , 应满足:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{u} = \mathbf{m}_j(x, z), \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{e} < 0. \end{array} \right\} \quad (16)$$

如果向量 \mathbf{u} 位于 $\mathbf{m}_{j,2}$ 和 $\mathbf{m}_{j+1,1}$ 之间, 那么切点为

点 H_j 。当隧道开挖曲线为凸时, 式 (16) 有唯一解, 可计算出边缘棱线与开挖面的切点, 从而将边缘棱线定位。之后可以求解出两个边缘棱线投影的交点。由于 Y 轴坐标不影响最大块体的形态, 那么可将交点的 Y 轴坐标设定为 0。将节理锥的所有棱线的起点设置为此交点, 即可构建出最大可移动区域。

2 曲面块体的重构

根据被定位的棱线可求解出各棱线与开挖面的切点及交点, 由切点、交点及节理锥的顶点可以构建出锥形块体。如图 3 所示, 六面体 $ABCDE$ 为所构建的锥形块体, 其 6 个面均为平面多边形。但实际开挖面为曲面, 因此 BCE 和 CDE 面实际上属于同一个曲面。针对所构建的六面体 $ABCDE$, 本文采用离散-切割-聚合的方法实现曲面块体的重构, 所得的曲面块体体积和滑动面面积更为精准。

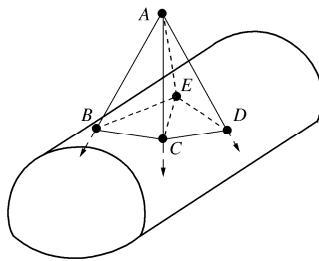


图 3 锥体的构建

Fig. 3 Construction of joint pyramid

2.1 曲面块体重构方法

(1) 虚拟结构面

本研究通过薄片单元的组合来构建曲面块体, 而虚拟结构面则是一组用来将锥形块体切割离散为薄片单元的假想平面, 并不真实存在, 它是为了获取更多块体内部信息而设定的辅助平面。单元的离散是以平面对多面体的切割算法为基础, 此算法针对凸多面体而设计, 因此虚拟结构面仅适用于凸多面体。

(2) 曲面块体重构过程

上一节所构建的锥体为凹多面体, 需将其转化为两个四面体。图 3 中六面体 $ABCDE$ 为凹体, 将其分解为四面体 $ABCE$ 和 $AECD$, 并分别重构。首先, 设定一组通过同一点的放射型虚拟结构面, 采用平面对凸多面体切割算法, 将两个四面体分别进行离散。其次, 采用曲面对凸多面体切割算法实现隧道开挖面对单元块体的切割, 以开挖面为界, 切割完成后的单元将被分为内外两部分。最后, 判断被切割后的单元与开挖面的位置关系, 开挖面外部的单元组合成为曲面块体, 此时完成了曲面块体的重构。以图 3 中的子块 $ACED$ 为例进行说明, 具体过程详见图 4。

a) 在开挖面曲线内部选定一点 O , 设置 3 个平面 P_E , P_D 和 P_C , 使它们分别通过 OE , OD 和 OC 且平行于隧道轴线。

b) 在平面 P_E 与 P_D 之间设置一组平面, 使它们均通过点 O 且与隧道轴线平行, 相邻平面间夹角为 φ , 如图 4 中的 $P1 \sim P4$ 。在 P_D 与 P_C 之间设置另外一组平面, 使它们均通过点 O 且与隧道轴线平行, 相邻平面间夹角为 η , 如图 4 中的 $P5, P6$, 令 φ 和 η 的值接近。

c) 棱锥体 $AECD$ 被所设置的平面分割为薄片单元, 如图 4 (a) 中的 $B1 \sim B8$ 。

d) 开挖面将每个单元分割成内、外两部分。图 4 (a) 中, $B4$ 被分为 $B4a$ 和 $B4b$, 开挖面外侧的所有单元被组合成为曲面块体, 如图 4 (b) 中的 Block。

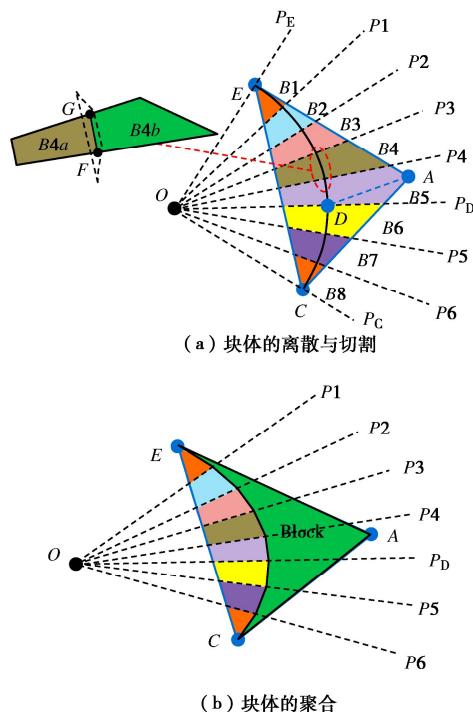


图 4 曲面块体的重构

Fig. 4 Reconstruction of surface blocks

2.2 柱状曲面切割单元块体

在平面对多面体切割的基础上, 本文提出了柱状曲面对单元块体的切割算法, 可实现开挖面的精细化构建。

(1) 单元中面的分类

单元块体的数据按照点-线-面一体的格式进行存储, 故切割的实质是面、线与曲面关系的判别。以简单的六面体单位为例, 对单元面的类型进行说明。如图 5 所示, y 轴为隧道走向, 在单元内部, 平行于 y 轴的面为 B 型面, 此类型的面是由虚拟结构面切割而产生的, 其余的面为 A 型面。为切割计算准备, 按照与切割曲面位置关系将单元的面划分为五类, 其判断

方法及图示见表 1, 图 5 中的实心圆点代表边与开挖面的交点。

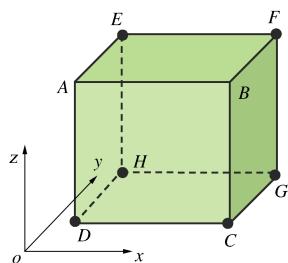


图 5 面的类型示意图
Fig. 5 Diagram of face type

表 1 面的类型

Table 1 Types of face

类别	判断方法	图示	
		A型面	B型面
I类面	除落在曲面上的点外, 其余顶点均在开挖面外侧		
II类面	除落在曲面上的点外, 其余顶点均在开挖面内侧		
III类面	顶点分布在曲面内外两侧		
IV类面	位于开挖面外, 以边的方式与开挖面接触		
V类面	位于开挖面内, 以边的方式与开挖面接触		

(2) 曲面切割单元块体流程

由于 B 型面平行于隧道轴线, 不会影响单元与开挖面间的位置关系, 在判断位置关系时可用 A 型面代替单元块体, 这将判断点的数量从八减少到四, 从而减少运算量。当 A 型面为 I 类时, 单元块体位于开挖面以内, 无需切割; 当 A 型面为 II 类时, 单元块体位于开挖面以外, 无需切割; 当 A 型面为 III 类时, 单元块体与开挖面相交, 需要对其进行如下方式切割。

曲面将与其相交的单元块体切割为内外两部分, 因此需定义 U1 和 U2 两个几何, 分别存储切割后位于曲面外侧和内侧的两部分子面, 定义面单元变量 P 用于存储切割形成的新面, 即切口, 对不同的面进行如

下操作: I 类面: 完整的放置于 U1 中。II 类面: 完整的放置于 U2 中。III类面: 开挖曲面与此类面存在两个交点, 两交点的连线将此面切割为两部分, 按照与开挖面的位置关系被分别放入 U1 和 U2 中, 除此之外将两交点连线放入 P 中。如图 6 所示, III类面 EFGH 与曲面相交于 A 和 B 两点, 直线 AB 将其分割为两部分, AFGH 面放入 U1 中, ABE 面放入 U2 中, 形成的新边 AB 放入 P 中, 用以组建单元的切口面。IV类面: 完整的放入 U1 中, 并且将与曲面接触的边放入 P 中。V类面: 完整的放入 U2 中。将IV, V类面与曲面接触的边放入 P 中。

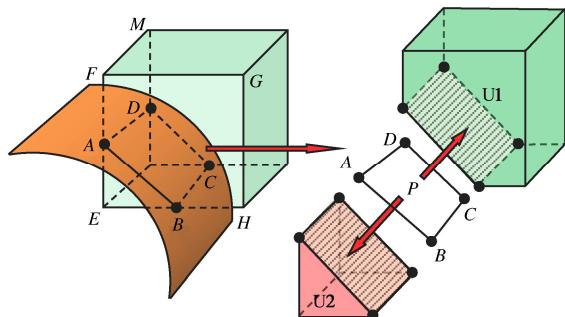


图 6 曲面切割单元块体

Fig. 6 Curve surface cutting element block

开挖曲面对单元内所有面切割完成后, P 内存储的边形成闭合回路 ABCD, 为一平面四边形。将其分别放入 U1 和 U2 中, 此时 U1 和 U2 将形成封闭体系, 即切割后形成的两个块体。

3 算法的实现与验证

采用 VC++实现了本文所提算法, 通过 OpenGL 完成可视化, 开发了隧道最大可移动块体程序 MKB V1.0。

(1) 以 4 组结构面为例, 在马蹄形开挖面的隧道工程中进行测试。图 7 展示了 MKB V1.0 构建的五面体锥体。由 2.1 节可知, 所构建的五面体是由两个四面体 (I 和 II) 组合而成。

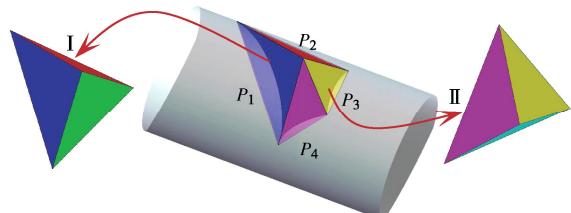


图 7 锥形块体的构建

Fig. 7 Construction of pyramid blocks

(2) 选取虚拟结构面间夹角 $\varphi=3^\circ$, 采用虚拟结构面对块体 I 和 II 进行切割, 将两个块体切割为薄片单元, 每个单元被开挖面分割为内、外两部分, 将所

有外部单元组合为曲面块体, 图 8 展示了曲面块体的重构过程。可以看出本文提出的方法可以较好地描述曲面, 图 8 中显示块体曲面与开挖面吻合度较高, 块体的边与开挖面相切。计算结果表明, 重构后与重构前的体积比为 0.513, 块体失稳形式为掉落, 无滑动面。重构后与重构前锥体侧面面积的比值分别为 0.792, 0.813, 0.745, 0.832。重构前后块体体积和侧面积比均有显著差异, 这将影响沿面滑动块体的安全系数。

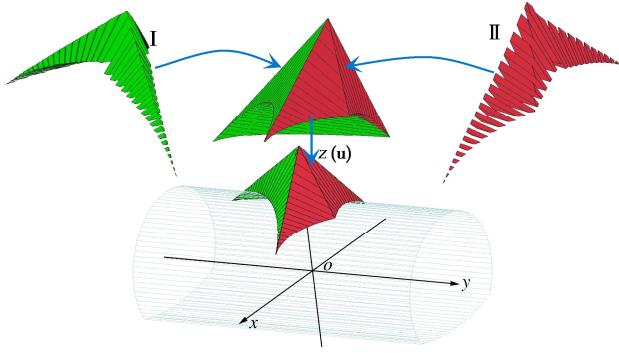


图 8 曲面块体重构

Fig. 8 Reconstruction of curve surface blocks

(3) 以 1° 为间隔, 将隧道走向从 0° 变换到 180° , 可以得到两条关于隧道走向的曲线 (图 9)。① 重构后与重构前块体的体积比曲线; ② 重构后与重构前滑动面面积比曲线。图 9 中显示, 不同走向时块体体积比值均在 0.4 左右, 滑动面的面积比值主要分布在 0.5~0.9 之间。在面积比曲线中, 比值为 0 表示无滑动面, 块体失稳模式为掉落。重构前后块体的参数差异较大, 因此重构曲面块体是必要的。

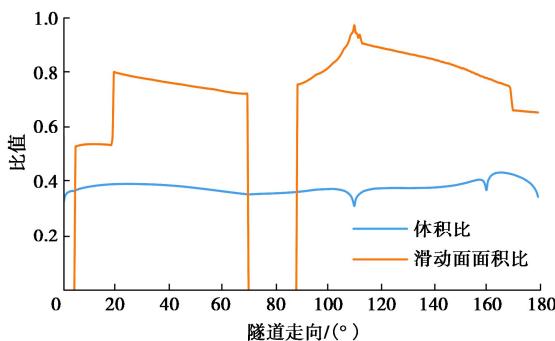


图 9 重构后和重构前参数的比值

Fig. 9 Ratios of parameters before and after reconstruction

4 工程应用

4.1 地质条件

辽宁省某隧道, 开挖面为马蹄状, 半径为 8.8 m。该区岩体主要分为太古代混合岩片麻岩, 节理裂隙发育, 节理略开放, 开放节理多充填碎屑和泥浆。该区域有 4 组结构面, 参数取每组结构面的平均值, 见

表 2。

表 2 结构面参数

Table 2 Parameters of the discontinuities

节理组	产状代表值	走向
F1	NE15°∠52°	NW105
F2	SW242°∠43°	NW152°
F3	SW203°∠39°	NW113°
F4	NW347°∠45°	NE77°

4.2 节理锥的构建

此工程存在四组节理, 在构建块体时存在五种结构面的组合情况, 即 A 组 F1-F2-F3-F4; B 组 F1-F2-F3, C 组 F1-F2-F4; D 组 F1-F3-F4 和 E 组 F2-F3-F4。以隧道走向为 0 度为例, 对最大可移动块体进行求解。求得节理锥集合的交线向量矩阵 N 和方向参数矩阵 H 分别为

$$N = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +0.7565 & -0.5217 & +0.3944 \\ +0.9482 & -0.3099 & +0.0690 \\ +0.3047 & -0.6470 & +0.6990 \\ +0.4048 & +0.6671 & +0.6254 \\ -0.7939 & +0.3364 & -0.5064 \\ -0.9625 & +0.0512 & -0.2664 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$H = (e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^\circ. \quad (18)$$

方向参数矩阵 H 中, 每列代表一个节理锥内不同棱线的方向参数, 由 4 条节理构成的锥体列号分别为 1, 6, 7, 10, 11 和 16, 其中, 第 7 和第 10 列所代表的节理锥无法与开挖面形成块体, 为无效节理锥。在矩阵 H 中通过式 (7) 构建矩阵 E_r , 结合式 (8), (10) 可求得节理锥所含棱线集的向量 V_r 。以 $JP-Xr$ 表示节理锥, 其中 X 为组号, r 的含义见 1.1 节。在 A 组中, $JP-A1$ 和 $JP-A16$ 顶角较大, 与开挖面围成的块体体积较小, 对工程稳定无影响。将 A 组中有效节理锥的基本信息展示在表 3 中。以同样方法可求得 3 条结构面参与构建的节理锥, 其中节理锥 $JP-B2$, $JP-B3$, $JP-B5$, $JP-B6$, $JP-C2$, $JP-C3$, $JP-C5$, $JP-C6$, $JP-D2$, $JP-D3$, $JP-D5$, $JP-D6$, $JP-E1$, $JP-E3$, $JP-E4$ 和 $JP-E6$ 的顶角较大, 与开挖面围成的块体体积较小, 对工程稳定无影响。将最大体块重构后在图 10 中进行三维展示。在组成锥体的棱线中, 若存在方向向下 (其 Z 轴分量为负数) 的棱线, 那么在重力作用下存在滑落的可能性。若一个锥体内, 所有棱线的 Z 向量均为正, 那么此锥

体仅在自重作用下是无法滑落的。因此, JP-A11, JP-B1, JP-C1, JP-D1 和 JP-E2 仅在重力作用下无法滑动。4 条结构面构建的最大块体为 JP-A6, 体积为 120.7 m^3 , 任意 3 条结构面构建的最大块体为 JP-E5, 体积为 85.5 m^3 。

表 3 F1-F2-F3-F4 构建的有效节理锥棱线向量

Table 3 Vectors of effective edges of joint pyramid constructed by F1-F2-F3-F4

交线	棱线向量 (x, y, z)			
	JP-A1	JP-A6	JP-A11	JP-A16
F1F2	—	$-N_1$	$+N_1$	—
F1F3	$+N_2$	$-N_2$	$+N_2$	$-N_2$
F1F4	$-N_3$	—	—	$+N_3$
F2F3	$-N_4$	—	—	$+N_4$
F2F4	$+N_5$	$+N_5$	$-N_5$	$-N_5$
F3F4	—	$+N_6$	$-N_6$	—
注	体积小			体积小

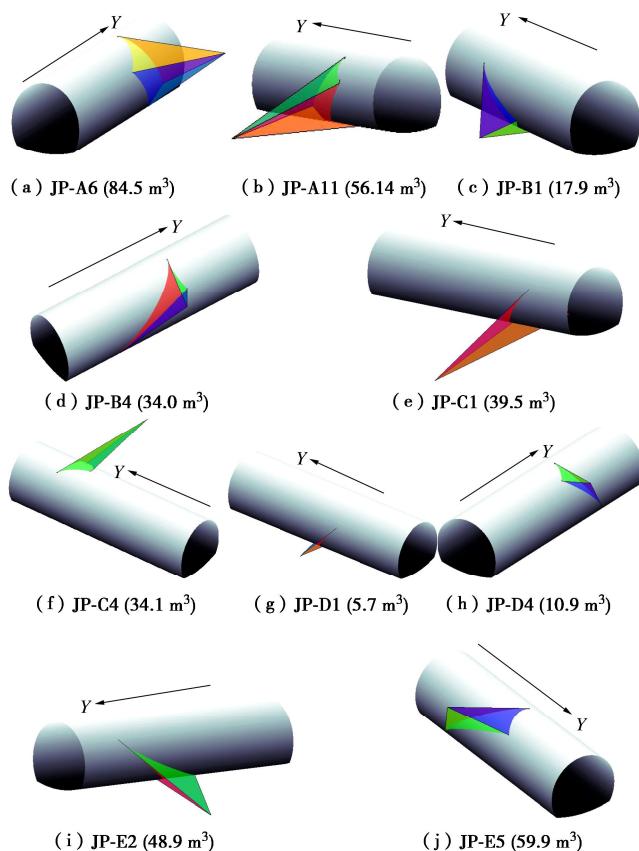


图 10 最大块体形态

Fig. 10 Shape of maximum block

4.3 虚拟结构面夹角的选择

单元块体的短边尺寸由虚拟结构面的夹角 φ 决定, 夹角越小则块体的临空面越接近真实情况, 但同时也将占用更大的内存和花费更多的计算时间, 因此需要选择合适的夹角。在本工程中, 将隧道走向 θ 分别设置为 0° , 45° , 90° , 135° , 计算得到的块体体积随虚拟结构面的夹角 φ 值而变化。以 φ 为横坐标, 以重构之后与重构之前的体积比为纵坐标得到曲线图 11。图 11 中显示随 φ 值的减小, 体积比趋于一个定值。

拟合 4 条曲线, R^2 均在 0.997 以上。因此, 拟合曲线可以准确的预测不同隧道走向下 $\varphi=0^\circ$ 时的体积比。表 4 展示了计算结果, 并给出了 φ 为 5° , 0° 时纵坐标的差值百分比, 均小于 5%。因此本工程将 φ 取值为 5° , 足以满足工程计算的精度。

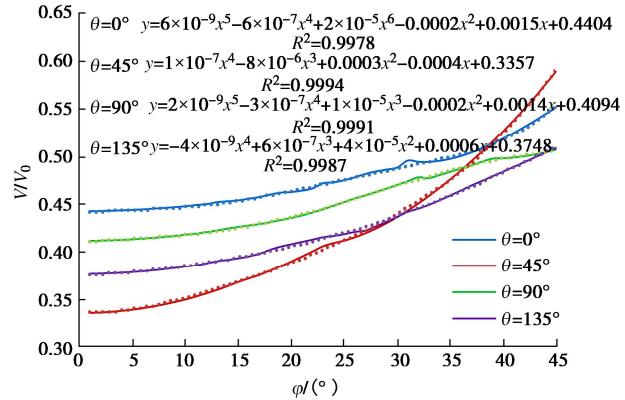


图 11 夹角与计算精度间的关系

Fig. 11 Relationship between intersecting angle and calculation

表 4 φ 为 5° , 0° 的体积比

Table 4 Volumetric ratios under φ of 5° and 0°

隧道走向 θ	0°	45°	90°	135°
$\varphi=5^\circ$	0.4438	0.3395	0.4134	0.3784
$\varphi=0^\circ$	0.4404	0.3357	0.4094	0.3748
差值百分比/%	0.77	1.13	0.978	0.96

4.4 隧道走向的选择

由于结构面的隐蔽性, 其力学参数很难准确获得, 这给块体稳定性计算带来了困难。采用最大可移动块体的体积作为指标, 对隧道走向进行评价。以 1° 为间隔, 依次将隧道走向从 0° 改变到 179° 得到了两条角度与最大块体体积的曲线, 如图 12。蓝色曲线代表 4 条结构面构建的五面体的体积, 红色曲线表示仅有 3 条结构面参与构建的最大四面体的体积。当隧道走向变化到特定值时, 块体与开挖面相切的边将改变, 导致最大块体的形成方式改变, 从而引起体积变化率的突变。两条曲线中均有 4 次曲率的突变, θ 分别为 77° , 105° , 113° , 152° 。其中 $\theta=113^\circ$ 时四面体体积的曲率变化并不明显。图 13, 14 展示了 θ 为 77° , 105° , 152° 等 3 个极值点处的最大四面体和最大五面体形态和体积。当 $\theta \in [0, 38]$ 或 $\theta \in [174, 180]$ 时, 由 4 条结构面构建的五面体体积大于由任意 3 条结构面构建的四面体体积。而目前的文献均采用四面体进行最大块体的评估, 从工程设计角度考虑, 这种做法并不能涵盖所有情况。因此在求解最大可移动块体时, 应该同时考虑四面体和五面体, 从而进行包络设计。曲线图清晰地显示了隧道不同走向时块体的最大体积, 在 $\theta \in [77^\circ, 105^\circ]$ 及 $\theta=152^\circ$ 附近将形成体积较大的可移动四面体, 因此在选择走向时应尽量避免。

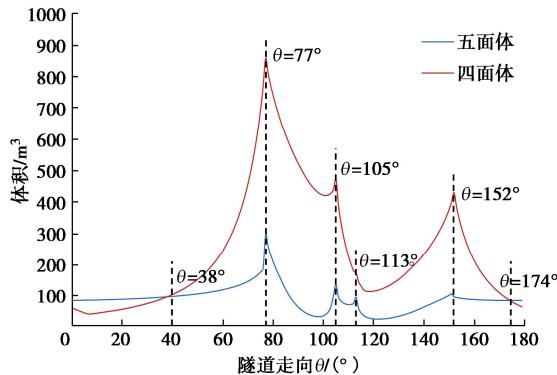


图 12 最大块体体积与隧道走向间的关系

Fig. 12 Relationship between volume of maximum block and tunnel direction

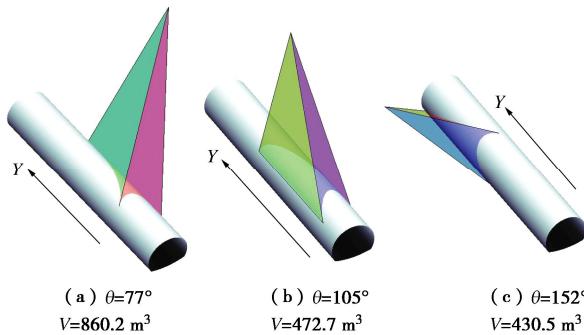


图 13 曲线极值处四面体形态

Fig. 13 Tetrahedral morphologies at extreme of curve

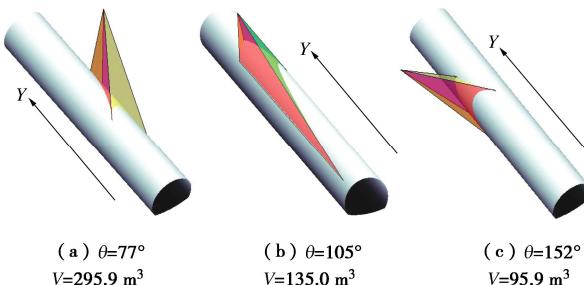


图 14 曲线极值处五面体形态

Fig. 14 Pentahedral morphologies at extreme of curve

5 讨 论

MKB V1.0 仅考虑形成最大块体的边界结构面。若结构面密度较大, 则其余结构面被认为是块体内部裂隙。边界结构面的产状取本组结构面产状的均值。当 4 组以上结构面相互切割时, 除单个锥体外, 还可能存在两个及以上锥体相交的情况, 此时它们联合可能会形成复杂的可移动区域, 如图 15 中的锥体 I 和 II, 对此进行讨论。

(1) 当锥体顶点距离较近甚至重合时, 可将它们组合为一个大的锥体, 这个大锥体是可以通过 MKB V1.0 求得的。如图 16 所示, 当 5 个结构面均通过 A 点 (或接近) 时, 结构面 P_5 (蓝色阴影面) 两侧的锥

体 $A-EDCGF$ 和 $A-GFB$ 将组合为大椎体 $A-BCDE$, 这个椎体可利用结构面 P_1 , P_2 , P_3 和 P_4 求解得到。

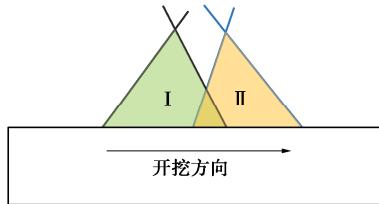


图 15 存在交集的两锥体

Fig. 15 Two pyramids with intersection

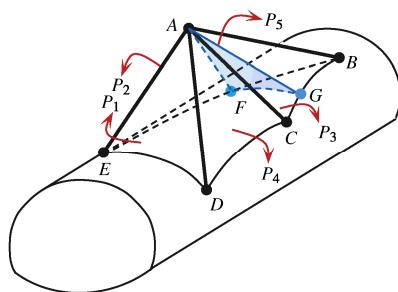


图 16 锥体的合并

Fig. 16 Conflation of pyramids

(2) 无法忽略锥体顶点间距离时, 锥体间的联合可能会形成复杂的可移动区域。此时图 15 中的组合区域与锥体顶点的距离有关, 这是定位结构面所面临的问题。需要采用概率模型模拟生成所有结构面。当确定了每条结构面的参数后, 再根据确定信息进行块体搜索, 通过大量模拟获取最大区域。MKB V1.0 考虑不同结构面组合下开挖面上潜在的最大可移动块体, 以最大块体体积为指标从块体理论角度来评价开挖面方向, 因此它不是一种确定性的块体识别方法, 是一种定量的风险评价指标。

6 结 论

MKB V1.0 将勘察中易于获取的结构面产状信息作为已知参数, 考虑结构面定位的任意性, 求解不同组之间可能形成的最大关键锥形块体。以最大块体体积为指标从块体理论角度来评价开挖方向的风险, 它不是一种确定性的块体识别方法, 而是一种风险评价指标。

(1) 提出的多曲线开挖面下的结构面定位方法可以有效的确定最大可滑动区域, 通过算例对此方法进行了验证, 显示了此方法对于多曲线组合而成的柱状开挖面的适用性。

(2) 在平面与曲面切割凸多面体算法的基础上, 采用了一种离散-切割-组合算法来重构曲面块体, 三维可视化算例显示重构的曲面与开挖面匹配度较高。与简化方法相比, 采用此方法获得的滑动面面积以及

块体体积更为准确。算例显示,重构后与重构前块体的体积比为 0.4 左右,滑动面面积比为 0.5~0.9,重构前后差异较大。因此,有必要对块体进行重构。此外,文中是以多面体为单元进行运算,多面体数据存储格式为“点-线-多边形-多面体”,统一了数据格式,提高了数据处理的效率,也符合计算机图形学的基本思想。

(3) 通过工程实例进行了最大块体求解,其中包括四组结构面参与构建的五面体以及任意 3 组结构面参与构建的四面体,结果显示在隧道走向相同的情况下,存在五面体体积大于四面体体积的情况,因此在对隧道进行最大可移动块体分析过程中不能忽视五面体的影响,应综合考虑两种块体。

(4) 本文所提方法尚无法考虑以下两种情况:①由于结构面定位的不确定性,两个以上锥体存在重合区域时,求解潜在最大联合区域是一项较为复杂的工作,目前鲜有文献关注,是一项值得研究的问题,但应在结构面统计分布的基础上对其进行研究才具有工程意义。②非平面结构面之间形成的块体。非平面的凹凸结构面具有非规则性,多采用离散的三角单元或样条曲线曲面进行描述,它对围岩的切割应建立在围岩离散单元基础之上。本文仅利用这种思想做了初步探索,采用开挖曲面对离散后的薄片单元进行切割,尚未实现非平面结构面对围岩的切割,但离散-切割思想应用于此方面是一项值得研究且有意义的工作。

参考文献:

- [1] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1985.
- [2] PRIEST S D. Discontinuity Analysis for Rock Engineering[M]. London: Chapman & Hall, 1993.
- [3] DELPORT J L, MARTIN D H. A multiplier method for identifying keyblocks in excavations through jointed rock[J]. SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods, 1986, 7(2): 321-330.
- [4] LIN D, FAIRHURST C, STARFIELD A M. Geometrical identification of three-dimensional rock block systems using topological techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1987, 24(6): 331-338.
- [5] YU Q, OHNISHI Y, XUE G, et al. A generalized procedure to identify three-dimensional rock blocks around complex excavations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(3): 355-375.
- [6] ZHANG Z X, WANG S F, HUANG X, et al. Application of block theory for evaluating face stability under disc cutters loading of TBM, case study of a water-conveyance tunnel project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 249-263.
- [7] ZHANG Y T, XIAO M, CHEN J T. A new methodology for block identification and its application in a large scale underground cavern complex[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 168-180.
- [8] ZHENG Y H, XIA L, YU Q C. A method for identifying three-dimensional rock blocks formed by curved fractures[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 1-11.
- [9] 张子新, 孙 钧. 块体理论赤平解析法及其在硐室稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1756-1760. (ZHANG Zixin, SUN Jun. Stereoanalytic method for block theory and its application in stability analysis of a cave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1756-1760. (in Chinese))
- [10] 张奇华, 邬爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609-2614. (ZHANG Qihua, WU Aiqing, SHI Genhua. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in Baise hydraulic project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2609-2614. (in Chinese))
- [11] 杨 勇, 张敏思, 王述红, 等. 钓鱼台隧道复杂围岩设计施工过程关键块确定技术[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 105-111. (YANG Yong, ZHANG Minsi, WANG Shuhong, et al. Key block determination in the progress of design and construction of the Diaoyutai tunnel in complex surrounding rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 105-111. (in Chinese))
- [12] ELMOUTTIE M, POROPAT G, KRÄHENBÜHL G. Polyhedral modelling of underground excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 529-535.
- [13] LI M C, ZHANG Y, ZHOU S B, et al. Refined modeling and identification of complex rock blocks and block-groups based on an enhanced DFN model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 62: 23-34.
- [14] LIU J, LI Z K, ZHANG Z Y. Stability analysis of block in the surrounding rock mass of a large underground excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(1): 35-44.