

基于有限结构面的三维复杂块体切割研究

杨石扣, 任旭华, 张继勋

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 岩体的块体结构和结构面网络模型生成, 是进行各种力学分析和场分析的基础。详细研究了有限结构面进行复杂块体切割的过程, 提出了相应的算法, 并采用 C++ 语言编写了相应的程序。为描述块体切割后的复连通特性, 在块体数据结构中添加了有向壳的概念。结构面可以为简单的凸多边形, 也可采用形态更加复杂的凹多边形。通过面-面求交线、交线环路搜索形成有向环、有向环包含关系分析形成有向面、有向面拓扑搜索形成有向壳和有向壳包含关系分析形成块体等过程, 将有限结构面分别与各块体进行切割运算, 形成进行块体切割的一般方法。在切割过程中将得到的有向环, 有向面、有向壳和块体分别进行拓扑有效性校核, 满足要求后得到最终的块体和结构面网络模型。选取 4 个算例来验证该方法的可行性。计算结果表明, 该方法可以对复杂块体进行有效地切割, 结构面可以选择包括凹形面在内的复杂多边形, 方法具有普遍意义。

关 键 词: 有限结构面; 块体切割; 复杂块体; 结构面网络模型

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 08-2206-07

Study on cutting of 3D complex blocks with finite discontinuities

YANG Shi-kou, REN Xu-hua, ZHANG Ji-xun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The generations of blocks and discontinuities network model of rock mass are the basis of various mechanical analyses and field analyses. The cutting process of complex blocks is analyzed, the corresponding algorithms are described, and a C++-based program is developed. The concept of oriented shell is added to the data structure of block in order to describe the multiply-connected characteristics of block. The discontinuities can be simple convex polygon and complex concave polygon. General blocks are cut by finite discontinuities, through calculating the intersecting lines of faces, generating loop vectors by searching intersecting lines, generating face vectors by analyzing the relationship of loop vectors, generating shell vectors by topologically searching face vectors, generating blocks by analyzing the relationship of shell vectors and so on, and then a general method of block cutting is proposed. The validity check of obtained loop vector, face vector, shell vector and blocks is conducted during the cutting process. The final blocks and discontinuities network model are obtained when satisfying with topological validity check. Four examples are selected to validate the method. The results show that the method can effectively cut complex blocks and the discontinuities can be complex polygon including concave surface, and indicate that the method is universal.

Keywords: finite discontinuities; block cutting; complex block; discontinuities network model

1 引 言

自然界的岩体内部普遍存在着具有一定方向、力学强度相对较低的结构面, 可以为断层、裂隙、节理和软弱夹层等, 这些结构面根据其延伸大小又可分为无限的和有限的。正是这些结构面的相互切割形成了复杂的裂隙岩体, 并使得岩体的物理力学性质呈现出非均质性、非线性和强非连续性等特

征^[1]。在进行这些岩体的块体稳定分析、裂隙渗流、灌浆加固和水力劈裂等力学分析和场分析时, 关注的不仅仅是切割后形成的可动块体结构, 还需要关注这些结构面自身的几何形态特征, 如结构面的形状、大小和分布等, 因而在岩体中准确描述和形成这些块体和结构面网络具有非常重要的意义。

自石根华等^[2-4]于 1982 年提出关键块体理论以来, 对三维块体切割和识别已经取得了很多研究成

收稿日期: 2014-09-19

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2012BAK03B04); 国家自然科学基金青年基金 (No. 51209078)。

This work was supported by the National Key Technology Research and the Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2012BAK03B04) and the Youth Scholars of National Natural Science Foundation of China (51209078).

第一作者简介: 杨石扣, 男, 1985 生, 博士研究生, 主要从事水工地下结构工程方面的研究工作。E-mail: yangshikou@126.com

果。郑榕明等^[5]采用面向对象的设计思想研究了节理岩体三维块体系统的数据结构，但文中仅仅给出了块体的数据结构，对于块体形成算法涉及较少。陈剑平等^[6]根据随机不连续面计算机模拟技术，建立了岩体不连续面空间分布概率统计模型，并搜索出所有在临空面上出露的有限块体，确定其几何参数，其主要侧重于岩体稳定性的研究。邬爱清^[7]和张奇华^[8-11]等运用地质统计学与计算机技术随机模拟生成三维结构面网络，并系统研究了三维块体的形成方法。Shi^[12]研究了一般自由面上多面节理生成、节理块切割方法，基于裂隙多边形，介绍了块体切割的一般方法，主要采用圆形和四边形结构面，但文中对于复连通块体未作讨论。周翠英等^[13]将地层区域内部结构面和边界面作为某虚拟岩体的裂隙面，将地层全部切割成有限块体，利用矢量判别法判别出地层区域内的有限块体。王述红等^[14]采用数字摄像测量技术获取结构面信息，并提出将岩体划分、切割、合并等，形成形态复杂的空间块体模型，但计算过程相对较为复杂。石露等^[15]研究了无限切割下关键块体的搜索，而实际工程中结构面多为有限的或非贯通的。汪卫明等^[16]研究了含有非贯通裂隙的切割算法，采用等效的正多边形结构面，但对于复连通的情况文中未作出说明。张雨霆等^[17]提出岩石块体识别的单元重构-聚合方法，但文中对于诸如五边形面的切割等操作时，选用了辅助线，将复杂多变形分为多个简单多边形，计算相对复杂。

本文详细研究了有限结构面进行复杂块体切割的过程，并提出了相应的算法和采用 C++ 语言编写了相应的程序。结构面可以为简单的凸多边形，也可采用形态更加复杂的凹多边形。在块体数据结构中添加有向壳的概念，保证块体描述的完备性。详细分析了面-面求交线、交线环路搜索形成有向环、有向环包含关系分析形成有向面、有向面拓扑搜索形成有向壳和有向壳包含关系分析形成块体等过程。将得到的有向环、有向面、有向壳和块体分别进行拓扑有效性校核，满足要求后得到最终的块体和结构面网络模型。

2 基本原理和基本算法

2.1 块体描述数据结构

描述块体信息的数据结构直接关系到块体描述的精细程度，选用合理的块体数据结构可以使块体的描述更加全面。Ikegawa 等^[18-19]曾采用棱矢、面矢和矢体等概念来描述复杂块体，张奇华等^[10]称之为有向性原理，并在此基础上提出了封闭性原理，

定义了“正体”和“负体”的概念。本文也基于拓扑学的这种有向性原理，并扩展添加有向壳的概念，形成了以点、有向边、有向环、有向面和有向壳等为块体的基本数据结构，并且规定块体上所有面的法向指向块体外部。在此描述下，不再需要区分凹凸体^[10]，也不需要区分正体和负体，可以非常简单地描述复杂块体，包括具有复连通特性的块体和具有无限边界的块体。

为了表述清楚，选取图 1 中一简单六面体来说明本文的方法。图中可以描述两种块体，主要取决于面的法向。当所有面的法向都指向块体外时，如上表面法向沿向量 $\vec{P}$ 方向，则表示一个简单的六面体。对于块体上所有的面，面由一系列的有向边所定义有向环构成，并且沿法向满足右手螺旋规则，如上表面由有向边 $\vec{E}_{12}$ 、 $\vec{E}_{23}$ 、 $\vec{E}_{34}$ 和 $\vec{E}_{41}$ 定义的有向环决定，右表面由有向边 $\vec{E}_{56}$ 、 $\vec{E}_{67}$ 、 $\vec{E}_{78}$ 和 $\vec{E}_{85}$ 定义的有向环决定，各面上顶点独立编号。

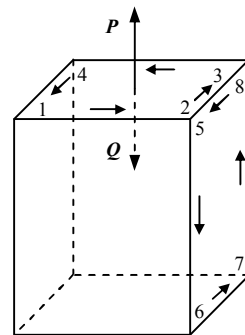


图 1 块体描述示意图

Fig.1 Description sketch for a block

当所有面的法向都指向块体内时，如上表面法向沿向量 $\vec{Q}$ 方向，则表示一个无限体中挖除了一个简单六面体。对于块体上所有的面，面也由一系列的有向环构成，并且沿法向满足右手螺旋规则，如上表面由有向边 $\vec{E}_{21}$ 、 $\vec{E}_{14}$ 、 $\vec{E}_{43}$ 和 $\vec{E}_{32}$ 定义的有向环决定，右表面由有向边 $\vec{E}_{65}$ 、 $\vec{E}_{58}$ 、 $\vec{E}_{87}$ 和 $\vec{E}_{76}$ 定义的有向环决定，各面编号独立。

对具有复连通特性的块体，需要引入有向壳的概念，以保证块体描述的完备性。块体由一系列的有向壳所定义，且有向壳的方向指向块体外，有向壳由一系列的有向面定义。如图 1 的块体只由一个有向壳所定义，这个壳包含 6 个面。当壳上面的方向沿 $\vec{P}$ 方向时，表示的是 1 个简单六面体，当沿 $\vec{Q}$ 方向时，表示 1 个无限体挖除了 1 个六面体。当块体如图 2 所示时，则其由 3 个有向壳所定义。

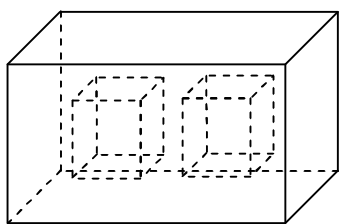


图2 复连通块体

Fig.2 Multiply-connected blocks with two holes

2.2 块体有限切割

进行块体有限切割的主要过程包括：面-面相互切割形成有向环、有向面，有向面组合形成有向壳，有向壳组合形成块体结构和计算结果的拓扑检查等，详细过程如图3所示。

(1) 面面求交形成有向环、有向面。对于面-面求交线形成有向环路，主要的问题是点和面的位

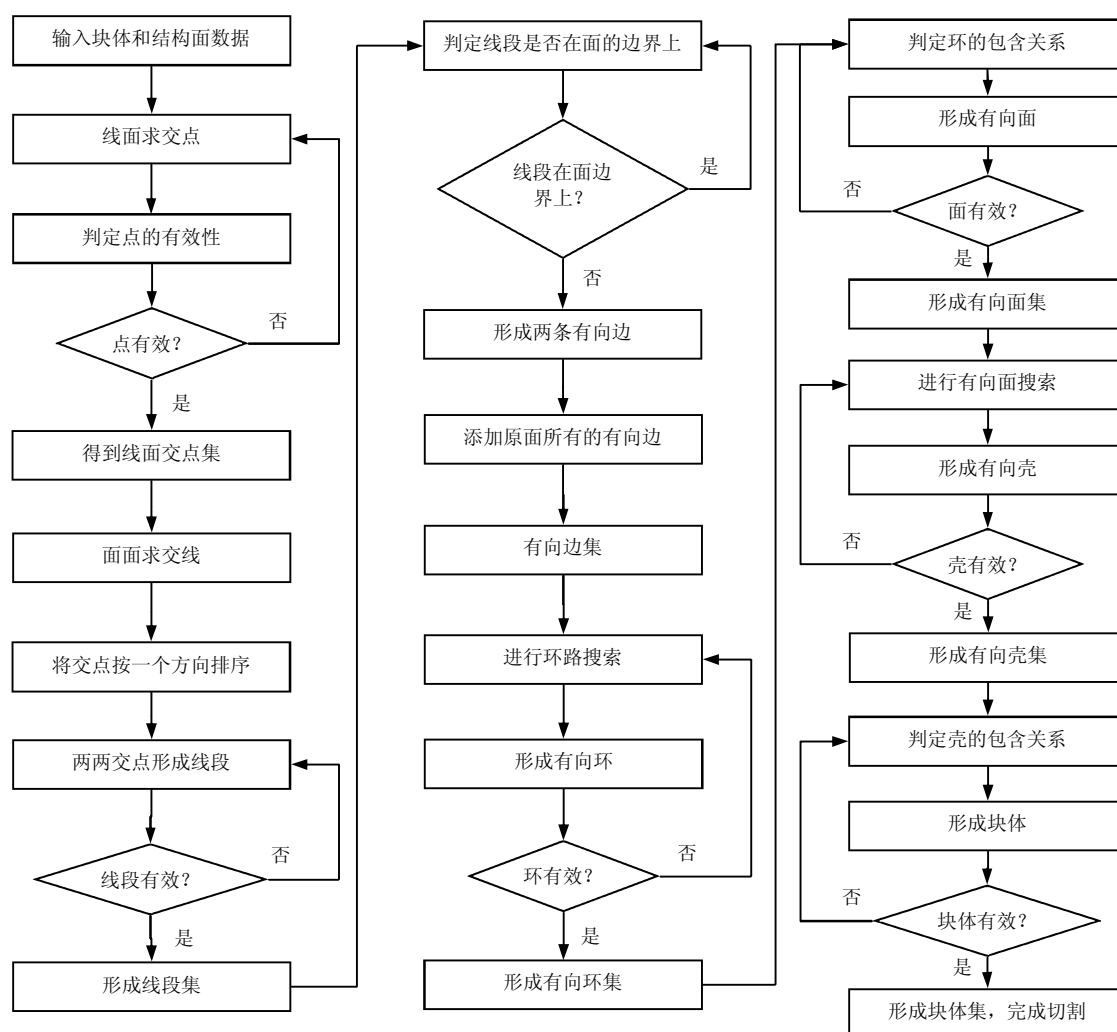


图3 基于有限结构面的块体切割流程图

Fig.3 Flow chart of block cutting with finite discontinuities

置关系的判定和有向边的生成问题。对点面位置关系，目前已经有许多方法，汪卫明等^[16]提出了点与凸多边形和凹多边形位置关系的判断方法，本文采用点法^[20]，过交点作射线，与多边形求交点，交点数为奇数表示点在多边形内，为偶数表示在外面，当然要排除点在边上的特殊情况。在得到两个面的交线后，需要将这些线分段，并去除无效边。设图4(a)中阴影区域为块体的某一个有向面，面由3个有向环所定义，被3个有限结构面切割，各生成一

条交线。选取一条交线为例说明本文方法，将其与有向面各边交点和其自身端点编号，编号后得到线段 E_{12} 、 E_{23} 、 E_{34} 、 E_{45} 、 E_{56} 、 E_{67} 和 E_{78} ，采用线段的中点来判定这些线段是否在有向面内，去除不在有向面内的线段后，得到有效线段 E_{12} 、 E_{45} 和 E_{67} ，判定这些线段是否在原有有向面的边界上，如果是则去除，将这些不在边界上的线段分割成两条有向边，如图4(b)所示，结合原有有向面边界上被分割的有向边进行环路搜索，得到如图4(c)所示的5个有向环，

通过这些环的包含关系得到图 4(c)所示的 4 个有向面, 其中一个有向面由两个有向环定义。

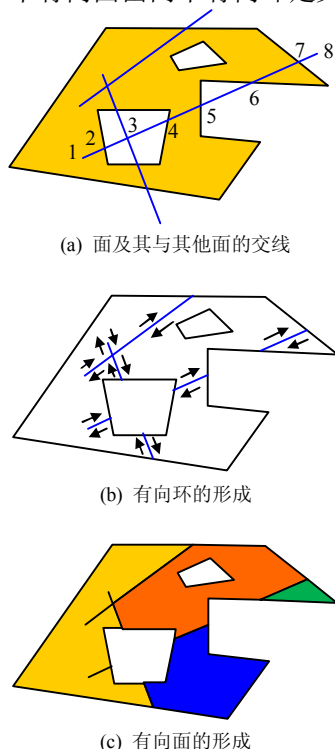


图 4 面面相交形成有向环、有向面过程
Fig.4 Generation of oriented loops and faces with intersection of faces

(2) 有向面搜索形成有向壳。块体切割搜索的基本思想是利用多面体有向边之和为 0 这一结论, 并采用最大右旋角或最小左旋角准则进行搜索^[21], 本文正是基于这一指导思想完成搜索的, 搜索之后将得到一系列的有向壳的集合。另外, 张奇华等^[10]还采用封闭回路和共棱的相关回路进行搜索。

(3) 块体搜索。块体搜索的过程就是进行有向壳分类的过程。将具有包含关系的块体进行分类, 定义块体的有向壳之间需要满足有向壳间不能出现相交和不能出现指向块体内部的壳等两个基本原则。因为壳都是有方向的, 并且约定构成块体的壳方向均是指向外部的, 故而如果计算过程中出现指向块体内部的壳则是有关问题的。根据这两个基本原则进行分类, 可以得到不同形式的块体。当块体存在包含关系时, 需要进行判断, 判断的原则是不能出现指向块体内部的壳。因为如果将内部块体的壳作为外部块体的壳, 那么就会出现指向块体内部的壳了, 简单的区分方法就是通过壳的正、负号区分。块体最外侧的壳体积必须是正的, 其内部的壳体积必须非正, 如果内部的壳体积为正, 则应将其作为新块体的外侧壳。

(4) 拓扑有效性校核。进行计算结果的有效性

检查是必须的, 以保证结果的准确性。Shi^[12]曾提出二维多边形拓扑性检查、三维块体拓扑性检查和块体体积检查, 李海枫等^[21]指出, 也可采用 Euler-Poincare 公式实现检查。张奇华等^[10]采用基于其提出的块体搜索方法和封闭性含义进行检查。鉴于含有树枝的结构面网格模型的重要性, 本文结果中的树枝没有去除, 故上述某些判定方法对本文不适用, 如 Euler-Poincare 公式。结合文中有向环、有向面和有向壳的定义, 分别采用以下标准进行有效性校核:

对有向环, 环的所有有向边矢量和为 0。对有向面, 构成有向面的有向环不能出现相交; 且不能出现与该有向面最外侧有向环方向相同的有向环。对有向壳, 所有有向面定义的有向壳必须要封闭。对块体, 构成块体的有向壳需要满足有向壳间不能出现相交; 不能出现指向块体内部的壳。

3 算例分析和结果

根据第 2 节块体切割的基本原理和算法, 作者采用 C++ 语言编写了相应的块体切割计算程序。为了说明程序的可行性, 文中给出 4 个算例说明方法和程序的可行性。

3.1 简单凸多边形结构面

此算例为一个凹形复杂块体在有限结构面下的切割, 如图 5(a)所示, 采用 5 条凸形有限结构面进行切割, 见图 5(b), 切割后共形成 16 个不同块体, 如图 5(c)所示。

3.2 复杂凹多边形结构面

此算例为一个带有孔洞的复杂块体在有限结构面下的切割, 如图 6(a)所示, 采用 5 条复杂形状的有限结构面进行切割, 见图 6(b), 切割后共形成 6 个不同块体, 如图 6(c)所示。

3.3 复连通复杂块体

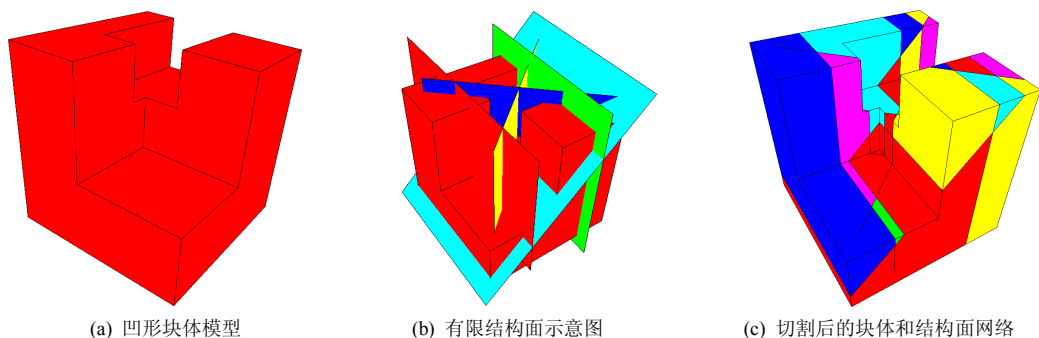
为了说明文中方法能够切割形成具有多个有向壳的复杂块体, 选取一个简单六面体(见图 7(a)), 在图 7(b)6 个有限结构面的切割下, 形成 2 个块体, 如图 7(c)所示。外面的块体由 2 个有向壳定义, 其内部的有向壳形态较为复杂, 内部的块体由一个简单的六面有向壳定义。

3.4 多结构面的块体切割

为了表明文中方法和程序对于大量有限结构面切割的处理能力, 以四川省大渡河瀑布沟水电站永定桥水利工程大坝建筑物附近的边坡为例, 如图 8(a)所示。为了简化计算分析, 假定岩体结构面为圆形, 并用正多边形加以表征, 且其几何参数(如倾向、倾角和半径)服从均匀分布, 随机产生 39

个结构面,如图 8(b)所示。在边坡模型中引入结构面后共形成 224 个不同块体,如图 8(c)所示,由此可见,文中方法和程序对于大量结构面的切割分析

也具有较好的适应性和应用性,这些结果可以作为采用有限元、离散元或其他数值方法进行进一步分析的基础。



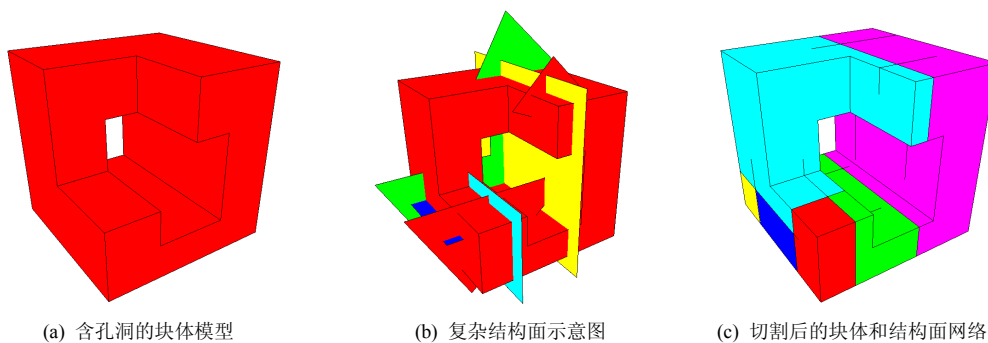
(a) 凹形块体模型

(b) 有限结构面示意图

(c) 切割后的块体和结构面网络

图 5 结构面为凸多边形的块体切割

Fig.5 Block cutting by discontinuities with simple convex polygon



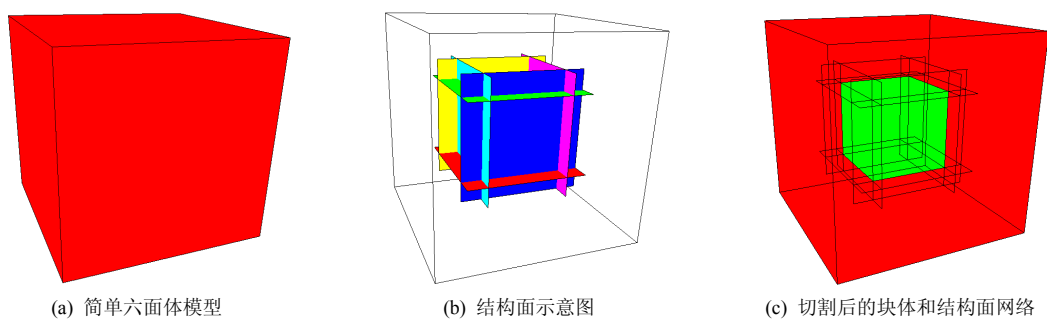
(a) 含孔洞的块体模型

(b) 复杂结构面示意图

(c) 切割后的块体和结构面网络

图 6 结构面为复杂凹多边形的块体切割

Fig.6 Block cutting by discontinuities with simple concave polygon



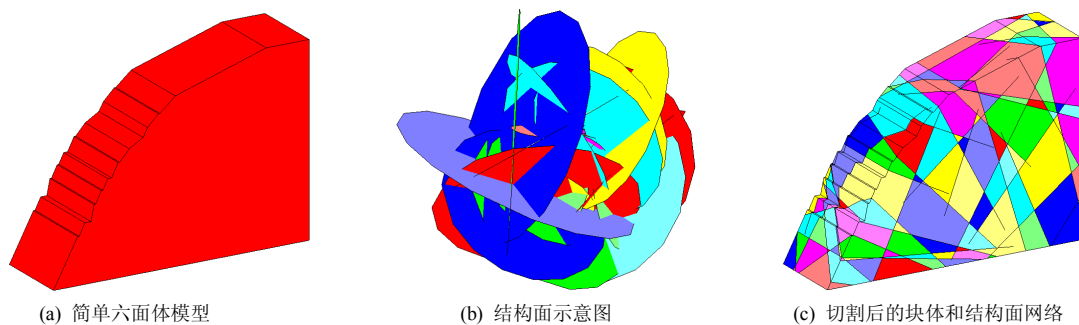
(a) 简单六面体模型

(b) 结构面示意图

(c) 切割后的块体和结构面网络

图 7 复杂复连通块体的切割形成

Fig.7 Generation of complex multiply-connected block



(a) 简单六面体模型

(b) 结构面示意图

(c) 切割后的块体和结构面网络

图 8 大量结构面的块体切割

Fig.8 Block cutting with many finite discontinuities

4 结 论

(1) 在块体数据结构中添加了有向壳的概念, 可以较好地描述块体的复连通特性, 使块体的数据描述更具有完备性。

(2) 通过面-面求交线、交线环路搜索、有向环包含关系分析、有向面拓扑搜索和有向壳包含关系分析等过程, 将有限结构面分别与各块体进行切割运算, 形成进行块体切割的一般方法。采用不同的校核标准, 分别对切割过程中形成的有向环、有向面、有向壳和块体进行拓扑有效性校核。校核时采用的基本原则是在程序实现和计算过程中进行的一些经验总结, 其严格的数学证明, 文中并未说明, 主要是这些原则是一些必要条件, 至于是否完备, 还有待进一步的研究总结。

(3) 4 个算例的计算结果表明, 文中方法不仅适用于凸形结构面, 也适用于形态更加复杂的凹形结构面, 具有普遍意义。输入结构面数据后, 文中方法可以准确有效地完成块体切割, 得到块体和结构面网络信息, 为顺利进行相关块体稳定分析、裂隙渗流、灌浆加固和水力劈裂等力学分析和场分析提供了重要保障。

参 考 文 献

- [1] 石丙飞, 陈剑平, 王清, 等. 块状结构岩体力学的回顾与展望[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 1): 40—43.
SHI Bing-fei, CHEN Jian-ping, WANG Qing, et al. A review and prospect for rock mechanics of blocky structure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp. 1): 40—43.
- [2] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, 3: 260—271.
SHI Gen-hua. Based on analysis of stereographic projection of rock mass stability[J]. *Science in China*, 1977, 3: 260—271.
- [3] SHI Gen-hua. A geometric method for stability analysis of discontinuous rocks[J]. *Scientia Sinica*, 1982, 25(3): 318—336.
- [4] GOODMAN R E, SHI G H. Geology and rock slope stability——application of the key block concept for rock slopes[C]//Proceedings of the 3rd International Conferences on Stability in Surface Mining. [S. l.]: [s. n.], 1982.
- [5] 郑榕明, 陈文胜, 葛修润. 节理岩体三维块体系统面向对象的数据结构[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 55—59.
CHENG Yung-ming, CHEN Wen-sheng, GE Xiu-run. Datastructure for three-dimensional blocky system based on object oriented programming[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(1): 55—59.
- [6] 陈剑平, 卢波, 王良奎, 等. 复杂不稳定块体的自动搜索及其失稳方式判断——基于随机不连续面三维网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1126—1131.
CHEN Jian-ping, LU Bo, WANG Liang-kui, et al. Automatic search for complex unstable rock blocks and the judgment of instability mode——Based on 3D network simulation of random fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1126—1131.
- [7] 郭爱清, 张奇华. 岩石块体理论中三维随机块体几何搜索[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 426—432.
WU Ai-qing, ZHANG Qi-hua. Geometric identification of stochastic block in block theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(4): 426—432.
- [8] 张奇华, 郭爱清. 基于凹形区分类的块体几何形态分析方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 299—303.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Morphological analysis method of block based on classification of concave zone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(3): 299—303.
- [9] 张奇华. 基于块体加与块体减算法的岩石块体几何形态分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 418—424.
ZHANG Qi-hua. Morphological analysis of rock blocks by block adding-subtracting method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(4): 418—424.
- [10] 张奇华, 郭爱清. 随机结构面切割下的全空间块体拓扑搜索一般方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2043—2048.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. General methodology of spatial block topological identification with stochastic discontinuities cutting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 2043—2048.
- [11] 张奇华, 郭爱清. 边坡及洞室岩体的全空间块体拓扑搜索研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2072—2078.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Study on spatial block topological identification of slope and cavern rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 2072—2078.
- [12] SHI Gen-hua. Producing joint polygons, cutting joint blocks and finding key blocks for general free surfaces[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2161—2170.
- [13] 周翠英, 董立国. 三维地层构造的块体理论方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1081—1084.
ZHOU Cui-ying, DONG Li-guo. Block theory for the structure of 3D stratum[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1081—1084.
- [14] 王述红, 杨勇, 王洋, 等. 基于数字摄像测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3432—3438.
WANG Shu-hong, YANG Yong, WANG Yang, et al. Spatial modeling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 3432—3438.
- [15] 石露, 李小春, 白冰. 基于自由面上环路对应节理无限切割的关键块体搜索[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2196—2202.
SHI Lu, LI Xiao-chun, BAI Bing. Key block searching based on joints infinite cutting of closed loop on free surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2196—2202.
- [16] 汪卫明, 赵向涛. 含非贯通裂隙的三维岩体拓扑识别的切割算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(3): 335—339, 349.
WANG Wei-ming, ZHAO Xiang-tao. Cutting algorithm for topology identification of three-dimensional rock mass containing discontinuous fissures[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2012, 45(3): 335—339, 349.
- [17] 张雨霆, 肖明, 丁秀丽, 等. 复杂岩石块体识别的单元重构-聚合方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 507—523.
ZHANG Yu-ting, XIAO Ming, DING Xiu-li, et al. Identification method of complex rock blocks using element reconstruction and aggregation technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 507—523.
- [18] Ikegawa Y, Hudson J. A novel automatic identification system for three-dimensional multi-block systems[J]. **Engineering Computations**, 1992, 9(2): 169—179.
- [19] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 51—55.
WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering**, 1998, 31(5): 51—55.
- [20] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
SHI Gen-hua. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis[M]. Translated by PEI Jue-min. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [21] 李海枫, 张国新, 石根华, 等. 流形切割及有限元网格覆盖下的三维流形单元生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 731—742.
LI Hai-feng, ZHANG Guo-xin, SHI Gen-hua, et al. Manifold cut and generation of three-dimensional manifold element under FE mesh cover[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 731—742.
- [15] YIN Z, WANG J. A one-dimensional strain-rate based model for soft structured clays[J]. **Science China Technological Sciences**, 2012, 55(1): 90—100.
- [16] GARLANGER J E. The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress[J]. **Geotechnique**, 1972, 22(1): 71—78.
- [17] LEONI M, KARSTUNEN M, VERMEER P A. Anisotropic creep model for soft soils[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(3): 215—226.
- [18] WANG L, DAN H, LI L. Modeling strain-rate dependent behavior of KR 0-consolidated soft clays[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2011, 138(7): 738—748.
- [19] MESRI G, CHOI Y K. Strain rate behaviour of Saint-Jean-Vianney clay: Discussion[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(4): 831—834.
- [20] BERRY P L, POSKITT T J. The consolidation of peat[J]. **Geotechnique**, 1972, 22(1): 27—52.
- [21] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20(4): 645—660.
- [22] YIN Z, YIN J, HUANG H. Rate-dependent and long-term yield stress and strength of soft Wenzhou Marine Clay: Experiments and modeling[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2015, 33(1): 79—91.
- [23] TONG F, YIN J. Experimental and constitutive modeling of relaxation behaviors of three clayey soils[J]. **Journal**

上接第 2205 页

of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,

2013, 139(11): 1973—1981.