

基于 TetGen 的复杂 FLAC^{3D} 模型可视化建模方法

荆永滨^{1,2}, 王李管^{1,2}, 贾明涛^{1,2}, 陈建宏

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2.中南大学 数字矿山研究中心, 长沙 410083)

摘 要: 为了充分发挥 FLAC^{3D} 在数值计算方面的优势, 解决在复杂地质体条件下岩体工程开挖存在的计算模型构建难度大、多采用简化模型而影响计算结果可靠性及准确性的问题。提出采用三维表面模型重建方法建立地质体及岩体工程的表面模型, 确定岩层、开挖等的封闭空间区域; 在此基础上, 通过约束德洛内四面体剖分的方法对三维表面模型形成的空间区域进行网格剖分。分析了网格生成器 TetGen 的输入、输出数据结构, 确定表面模型数据至 TetGen、TetGen 网格划分结果至 FLAC^{3D} 的对应关系, 实现能够准确描述地质体与工程开挖的 FLAC^{3D} 计算模型的构建。通过某大型深部开采铜矿的多个岩层和首采区 3 个盘区 63 个采场的模型构建实例, 证明该方法简单、可行、有效并且健壮。

关 键 词: 数值模拟; 岩体开挖; 表面模型重建; 四面体剖分; TetGen

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Visual modeling of complex FLAC^{3D} model based on TetGen

JING Yong-bin^{1,2}, WANG Li-guan^{1,2}, JIA Ming-tao^{1,2}, CHEN Jian-hong

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Research Center of Digital Mine, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: For excavation of rock mass in complex geological body, simplification methods of the numerical models are often utilized in that accurate models are difficult to construct. However, the reliability and accuracy of the computed results rely heavily on the model. A new method is proposed to construct the FLAC^{3D} model which can depict the geological body and excavation of rock mass accurately. Geological and excavation surface models are built from their boundaries to define the three-dimensional domains. Then, TetGen is used to generate the constrained Delaunay tetrahedralizations (CDTs) and quality tetrahedral meshes. The input and output data structure of TetGen is analyzed to transfer data from surface model to TetGen and from TetGen to FLAC^{3D} model. The FLAC^{3D} model of a deep mining copper mine is constructed, including several strata and 63 stopes. The results prove that this method is simple, feasible, effective and robust.

Key words: numerical simulation; excavation of rock mass; surface model reconstruction; tetrahedralization; TetGen

1 前 言

数值计算是分析岩土工程稳定性、可靠性问题的重要手段。美国 ITASCA 公司的 FLAC^{3D} 程序是率先将连续体的快速拉格朗日分析应用于岩土工程问题的计算软件, 极大地提高了数值模拟技术的应用价值, 已成为目前岩土力学计算中的重要数值方法之一。广泛应用于边坡稳定性评价、支护设计及评价、地下洞室、施工设计(开挖、填筑等)、河谷演化进程再现、拱坝稳定分析、隧道工程、矿山工程等多个领域^[1-2]。

尽管 FLAC^{3D} 有着强大的计算功能, 能较好地模拟材料的力学行为, 但 FLAC^{3D} 软件在建立计算模型时仍然采用键入数据/命令行文件方式, 不能直观显示, 建模过程可视化程度低。在建立较复杂的大型地质体模型时, 需要控制各个边界节点的坐标数据, 容易出错, 检查也不方便; 建模工作量直接造成三维模拟计算周期长、难度大。模型的建立只能用数据文件来实现^[1]。

为解决这个问题, 工程人员往往采用简化的计算模型进行计算, 简化模型无法体现地质体复杂的地质特征, 特别是对多介质地质体很难达到理想效

果,甚至出现计算模型与地质实际严重不符的情况,从而在很大程度上降低了计算结果的可靠性。

因此,许多学者在复杂地质体 $FLAC^{3D}$ 模型构建这一领域进行了很多工作。胡斌^[1]采用 FORTRAN 语言编写了 $FLAC^{3D}$ 的前处理程序,能快速建立地表形态复杂、岩层和地质结构较单一的地质体计算模型。廖秋林^[2]提出了基于 ANSYS 平台复杂地质体 $FLAC^{3D}$ 数值模型的自动生成方法。徐能雄^[3]提出将三维地质建模技术与岩土工程数值模拟相结合,借鉴基于剖面的建模技术,形成了适合于六面体剖分的三维地质建模方法;在此基础上,利用多重映射网格,实现了复杂构造岩体六面体网格剖分。毕林^[4]采用实体模型与块段模型套合技术,并把所构建的三维模型应用到力学分析模型中,实现了力学模型单元网格的自动划分,解决了多介质复杂结构条件下岩体工程开挖力学响应三维数值模拟问题。罗周全^[5],林杭^[6]提出基于 SURPAC 软件的直观、快速的 $FLAC^{3D}$ 模型生成技术。根据地质体块段模型与 $FLAC^{3D}$ 模型单元之间的关系,编写转换程序,得到 $FLAC^{3D}$ 模型。

文献[2—3]提出的数值模型构建方法主要适合于层状地质体,对于复杂地质体条件下不规则形状的地下岩体开挖则存在一些缺陷。文献[4—6]中地质块段模型的基本单元只能是规则六面体,并且边界单元只能次分一次才能符合 $FLAC^{3D}$ 中相邻单元合并节点的要求。因此,对于不规则岩体开挖,要求单元块尺寸很小才能建立较准确的计算模型,但因此造成模型单元数量巨大,可能导致 $FLAC^{3D}$ 无法进行计算。

因此,作者结合 Dimine 矿业软件,首先建立地质体及岩体开挖工程三维表面模型,然后对其进行约束德洛内四面体剖分建立非结构化网格模型,最后将其转化为后缀为“flac3d”或“f3grid”的计算模型。在 $FLAC^{3D}$ 中通过命令 impgrid 即可载入模型直接使用。

2 表面模型重建

对于岩体工程来说,地质体信息的数据来源主要是钻孔数据和地表等高线。钻孔数据能够提供局部地质结构的准确信息,地表等高线则描述地面形态。三维表面模型的重建主要就是根据这些钻孔数据以及解译过的平剖面图,其主要流程如图 1 所示。

地表模型通过对等高线进行德洛内三角化生成。地质体模型则根据每两个相邻剖面上的地质体轮廓线重构生成,根据边界线的类型不同,表面模

型的创建分为 4 类,如图 2 所示。例如,三角条带算法用于建立断层面、岩层分界面;外壳和分支算法用于构建较为复杂的矿体或开挖工程模型;区域三角化算法则用于构建矿体或开挖工程边界表面。

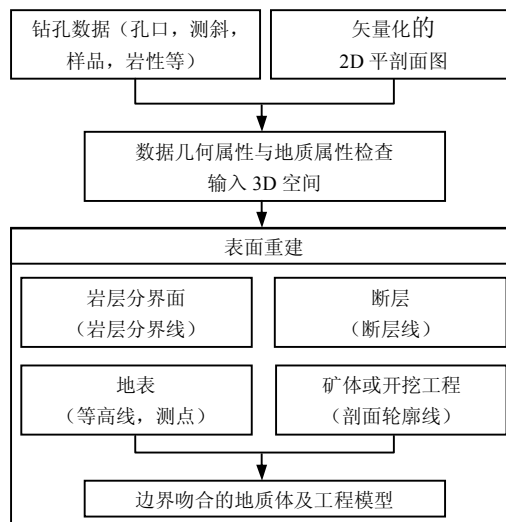


图 1 表面模型建模流程示意图

Fig.1 Sketch of workflow of 3D surface model reconstruction

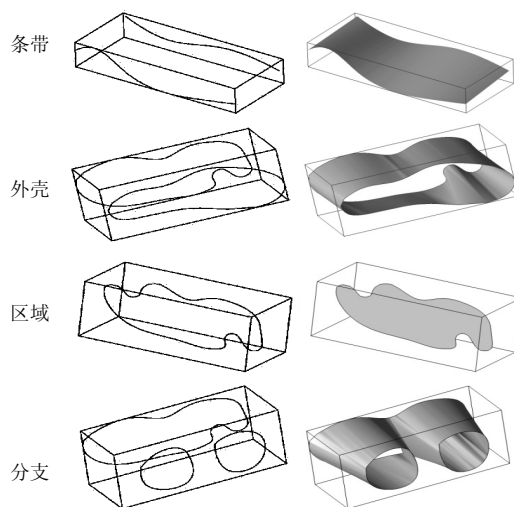


图 2 地质体及开挖表面模型建模的四种方法

Fig.2 Four construction methods for building geological surfaces and excavation surfaces from their boundaries

用于生成四面体网格的表面模型必须封闭,且面片之间不能有相交和重合。建模时根据 $FLAC^{3D}$ 中所需要的分组 (Group) 信息,建立各个分组区域的表面模型,相邻区域之间共享一个分界面模型,最终形成一个包含多个封闭区域的表面模型。

3 四面体网格自动生成

本文使用的四面体网格自动生成算法是开源的三维网格生成器 TetGen。TetGen 能够对三维空间进行约束德洛内四面体剖分生成高质量的四面体网格，同时可以通过插入顶点的方式对网格实施网格提纯，得到适合数值计算的网格形状与大小^[7-9]。TetGen 采用 ANSI C++ 语言，代码具有高度可移植性，能够在所有主流操作系统（例如，Unix/Linux，Windows，MacOS 等）编译和运行。在 Win32 系统上 TetGen 可以编译为控制台程序“tetgen.exe”或者是静态库“tetgen.lib”。本文采用静态库的方式使用 TetGen，可以直接将表面模型数据放入 TetGen 的输入、输出结构 tetgenio，同时可以直接从输入输出结构中取出计算结果进行后续操作，而不必再通过文件作为中介介质进行复杂的转换。

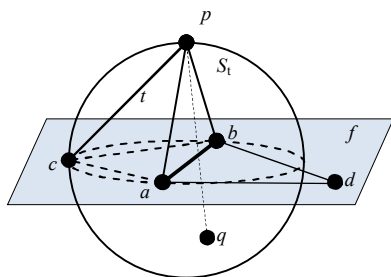
3.1 约束德洛内四面体剖分

约束德洛内四面体剖分 (CDT) 由 Shewchuk^[10] 提出，是一种类德洛内四面体剖分，它受约束于线性表面模型的形状。CDTs 是进行四面体剖分的较合适的结构，因为其不仅考虑了原始边界，而且从德洛内四面体剖分继承了许多好的数学属性，适合于数值方法。

给定一个表面模型 X ， X 的一个 CDT 定义如下^[10]：

设 V 是 X 的顶点的集合， σ 是 V 中的顶点形成的任意一个单纯形（四面体、三角形、边或顶点）。如果 σ 存在外接球，该外接球不包含 V 中的顶点，则 σ 符合德洛内。 D 是 V 的德洛内四面体剖分， D 中所有单纯形均为德洛内。对于一般的 V （无 5 个或以上顶点在一个共同的球面上）， D 是惟一的。

对于两个顶点 p 和 q ，如果存在约束面 f 使得 p 和 q 分别位于 f 所在平面的两侧，线段 pq 与该面相交，则 p 和 q 之间不可见（如图 3）。线段不影响可见性，如图 3 中，尽管 ab 是线段，但 c 和 d 之间可见。



图中，填充区域表示 X 中包含顶点 a, b, c 和 d 的一个面 f 。 S_t 是四面体 $t(abc p)$ 的外接球，其包含 q 不包含 d ， t 符合约束德洛内。

图 3 约束德洛内四面体

Fig.3 Constrained Delaunay tetrahedron

对于 X 中的顶点形成的四面体 t ，如果其外接球不包括 X 中对于 t 内部的任意一点是可见的顶点，则 t 符合约束德洛内。对于四面体剖分 T ，如果 T 和 X 的顶点一致且 T 中的四面体覆盖 V 的凸包， T 是 X 的约束四面体剖分。 X 的每条线段都是 T 中的一条边， X 的每个面都是 T 中三角面的并集。那么，对于 X 的约束四面体剖分 T ，如果满足每个四面体都符合约束德洛内，则 T 就称之为 X 的约束德洛内四面体剖分。

3.2 TetGen 输入输出数据结构

tetgenio 结构实际上是点、面、四面体等数组的一个集合。使用表面模型进行四面体剖分，输入时需要赋值的变量和存放输出结果变量见表 1，

表 1 tetgenio 结构输入输出变量
Table 1 Variants of tetgenio structure for input and output

变量	意义
int numberofpoints;	顶点个数
REAL *pointlist;	点坐标数组，第一个点的 x 坐标在索引位置 [0]， y 坐标在位置 [1]， z 坐标在位置 [2]，之后是下一个点的坐标，每个点占 3 个数组元素位置。
int numberoffacets;	面片个数
facet *facetlist;	面片数组，每个元素是一个 facet 结构。该结构存放每个多边形面片的顶点个数以及顶点编号。
int *facetmarkerlist;	面片标记数组，每个面对应一个值
int numberoftetrahedra;	四面体个数
int *tetrahedronlist;	四面体顶点数组，四面体的第一个顶点在索引位置 [0]，之后是其他顶点。
REAL *tetrahedronattributelist;	四面体属性数组
int numberofholes;	洞个数
REAL *holelist;	洞数组，第一个洞的 x 、 y 、 z 坐标在索引位置 [0]、[1] 和 [2]。
int numberofregions;	区域个数
REAL *regionlist;	区域属性数组，五个元素为一组。索引 [0]、[1]、[2] 分别为第一个区域的 x 、 y 、 z 坐标，索引 [3] 是区域属性，索引 [4] 是最大体积。

其中，洞表示网格生成结果中，惟一包含该点坐标的表面模型封闭区域内的四面体单元将被去除形成空区域。区域属性数组，例如 [4 438.09, 2 686.13, -793.33, 7, 100]，前 3 个元素是表面模型封闭区域内部的一个点的坐标。第 4 个元素表示该区域内四面体单元的属性，对应 FLAC^{3D} 网格模型中的 ZGROUP 属性，以便将不同区域内的四面体单元赋予不同的属性值，存储在数组 tetrahedronattributelist 中，从而转换为 FLAC^{3D} 模型中的不同分组。区域属性中最大体积值若不设置，则生成网格时将不限

制四面体单元体积。

3.3 TetGen 参数

TetGen 提供了多个参数选项,通过这些选项及参数值可以控制程序进行何种操作以及控制生成网格的各种几何属性值。在对表面模型进行四面体剖分过程中,主要使用以下参数^[9]:

p : 对表面模型执行四面体化操作; q : 生成高质量网格,附加最小径边比数值,默认为 2.0; a : 四面体单元最大体积约束,附加体积值; A : 添加属性至特定表面模型区域内的四面体单元; r : 对四面体网格进行网格提纯操作。

3.4 网格质量检查

对表面模型进行四面体剖分后生成的网格模型是否满足计算模型的要求,需要对其进行可视化检查以及数值参数统计。网格质量统计一般包括,四面体体积、四面体高宽比和四面体二面角等。对于一个四面体单元,如图 4 所示,网格质量定义如下^[11-12]:

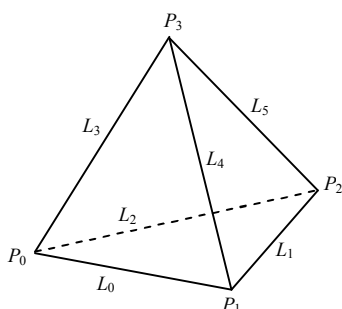


图 4 四面体单元顶点及边
Fig.4 Vertices and edges of a tetrahedron

四面体各个边向量分别定义为: $\vec{L}_0 = \vec{P}_1 - \vec{P}_0$, $\vec{L}_1 = \vec{P}_2 - \vec{P}_1$, $\vec{L}_2 = \vec{P}_0 - \vec{P}_1$, $\vec{L}_3 = \vec{P}_3 - \vec{P}_0$, $\vec{L}_4 = \vec{P}_3 - \vec{P}_1$, $\vec{L}_5 = \vec{P}_3 - \vec{P}_2$ 。四面体各个边长定义为: $L_0 = \|\vec{L}_0\|$, $L_2 = \|\vec{L}_2\|$, $L_1 = \|\vec{L}_1\|$, $L_3 = \|\vec{L}_3\|$, $L_4 = \|\vec{L}_4\|$, $L_5 = \|\vec{L}_5\|$ 。

最大最小边长分别为 $L_{\min} = \min(L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5)$, $L_{\max} = \max(L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5)$ 。

根据以上定义,则四面体体积为

$$V = \frac{(L_2 L_0) L_3}{6} \quad (1)$$

内接圆半径为

$$r = \frac{3V}{A} \quad (2)$$

其中 A 为四面体的表面积

$$A = (\|\vec{L}_2 \times \vec{L}_0\| + \|\vec{L}_3 \times \vec{L}_0\| + \|\vec{L}_4 \times \vec{L}_1\| + \|\vec{L}_5 \times \vec{L}_2\|) \quad (3)$$

高宽比为

$$q = \frac{L_{\max}}{2\sqrt{6}r} \quad (4)$$

二面角为

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \arccos(\vec{n}_1 \vec{n}_2) \quad (5)$$

式中 $\vec{n}_1$ 、 $\vec{n}_2$ 分别为共边的两个面的单位法向量。

4 四面体网格到 FLAC3D 模型转换

FLAC^{3D} 网格文件后缀通常为“flac3d”,是一个 ASCII 文件,其文件格式如下:

节点: [G] [节点编号] [x 坐标] [y 坐标] [z 坐标]

单元: [Z] [单元类型] [单元编号] [节点 1] [节点 2] ... [最后节点]

分组: [ZGROUP] [分组属性] [单元 1] [单元 2] ... [最后单元]

以星号开始的行为注释行。通常将节点数据放在前面,以 GRIDPOINTS 注释;之后是单元数据,以 ZONES 注释;最后是分组数据,以 GROUPS 注释。

FLAC^{3D} 4.0 增加一种后缀为“f3grid”的网格文件,其格式与“flac3d”后缀的文件格式大致相同,不同处在于分组数据。分组属性需添加单引号,分组内的单元编号需另起一行,如下,

[ZGROUP] ['分组属性']

[单元 1] [单元 2] ... [最后单元]

输出结果和 FLAC^{3D} 网格文件基本上是一致对应的。在输出结果的 tetgenio 数据结构中,点坐标数组对应节点数据;四面体顶点数组对应单元数据,单元类型为 T4;四面体属性数组对应分组数据。在输出分组数据时,可以将每个四面体单元写入一条分组记录,FLAC^{3D} 程序会自动将分组按属性进行组合。转换后的网格文件通过命令 impgrid 导入 FLAC^{3D} 使用。

导入的网格中只包括节点,单元和单元分组数据。要建立接触面单元,可通过 GENERATE separate 命令为子网格的共用面生成新节点,从而将网格分离为子网格,然后用 INTERFACE wrap 命令在子网格上生成接触面单元。其使用格式如下: gen separate gname, gname 为要分离的网格分组名; interface i wrap gname1 gname2,在分组 gname1 的网格面上创建接触面单元。

5 工程应用

某大型深部开采铜矿首采区分为 I 号、II 号和

III号 3 个盘区。采场布置如图 5 所示, I 号盘区共有 19 个采场, 编号为 521~5219, 编号的前两位数代表该盘区所处勘探线号, 其中单数为矿柱, 双数为矿房; II 号盘区共有 23 个采场; III号盘区共有 22 个采场。首采区的开采顺序, 共设计了 3 种回采方案。

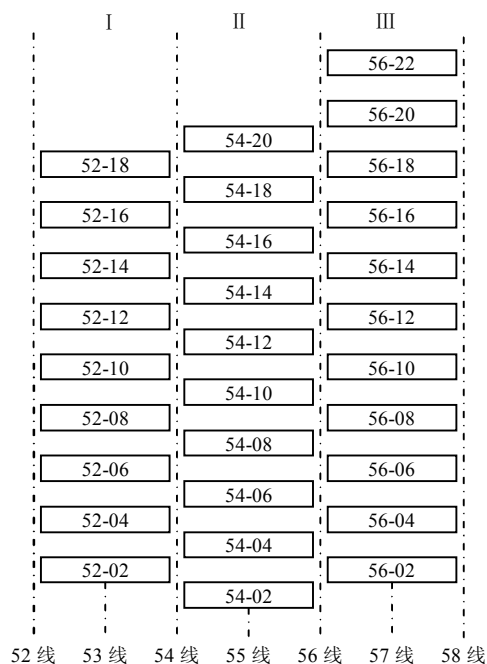


图 5 首采区采场及盘区布置示意图

Fig.5 Stopes and panels layout of first mining area

方案 1: 先回采 I 号盘区, 再回采 II 号盘区, 最后回采 III 号盘区; 每个盘区按隔一采一的回采顺序进行开挖。

方案 2: 先回采 I 号盘区, 再回采 II 号盘区, 最后回采 III 号盘区; 每个盘区按隔三采一的回采顺序进行开挖。

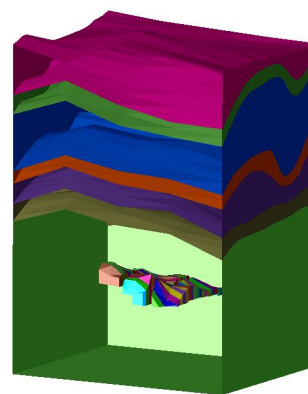
方案 3: 先同时回采 I 号和 III 号盘区 (I 号盘区从下往上回采, III 号盘区从上往下回采), 最后回采 II 号盘区; 每个盘区按隔一采一的回采顺序进行开挖。

采用数值模拟的方法, 定量地计算和分析每步回采过程中, 采场围岩位移、应力和塑性破坏区的动态变化过程; 比较不同回采顺序和开挖步骤下的围岩稳定状态, 确定最佳的回采顺序, 以确保生产安全以及提高生产效率。

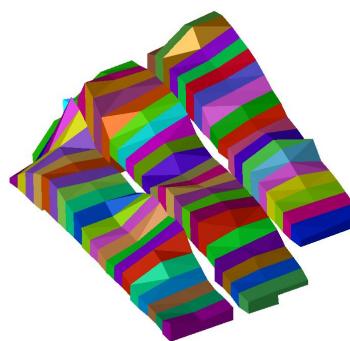
5.1 矿区岩层模型及采场模型

该矿山的地质岩层有一个很重要的特征, 就是其地层界线非常明显, 矿区除部分地段为第四系冲积、坡积层覆盖外, 出露地层均为三迭系中、下统,

局部有上统零星分布; 深部工程揭露的地层有二迭系、石炭系、泥盆系上统诸地层。其岩体地层具体包括: 南陵湖组 (T2n)、塔山组上段 (T1t3)、塔山组中段 (T1t2)、塔山组下段 (T1t1)、小凉亭组 (T1x)、大隆组 (P2d)、龙潭组 (P2l)、孤峰组 (P1g)、栖霞组 (P1q)、黄龙船山组 (C2+3) 及五通组 (D3w)。如图 6 所示, 分别为切割后的地层模型、采场模型。



(a) 去除岩层边界的整体模型



(b) 采场模型

图 6 岩层、采场三维表面模型

Fig.6 3D surface models of strata and stopes

5.2 转换为 FLAC^{3D} 模型

对岩层模型在 XY 平面上任意切割得到一个剖面, 通过该剖面即可快速确定各个岩层区域内的一个点坐标。岩层属性从 1 开始, 从上至下递增, 岩层区域四面体单元体积最大值设置为 2 000, 区域属性数组为 [4 093.13, 2 491.89, -2.31, 1, 2 000]。同样, 对 3 个盘区的采场分别进行切割, 在剖面图上确定各个采场区域内部的一个点坐标。采场属性按采场名称命名, 例如, 52-01 采场属性为 5201, 采场区域四面体单元体积最大值设置为 100, 区域属性数组为 [4 393.38, 2 392.59, -726.53, 5201, 100]。FLAC^{3D} 模型结果如图 7 所示, 图 7(a)为总模型,

图 7(b)为只显示采场分组的模型。

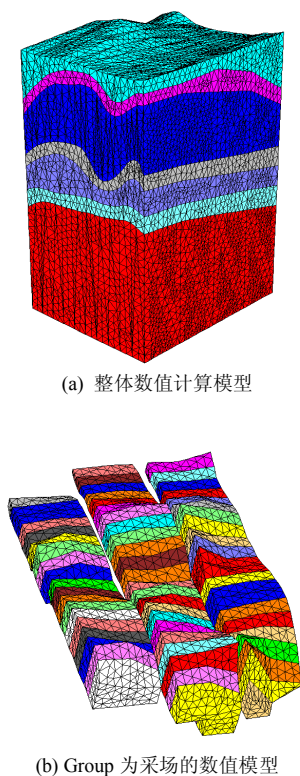


图 7 开采方案 FLAC3D 数值计算模型

Fig.7 Numerical model of first mining area

6 结 语

本文针对岩土工程计算软件 $FLAC^{3D}$ 建模功能弱的缺点,将三维表面模型构建快捷、形状准确的特点同 TetGen 快速、优质的约束德洛内四面体剖分功能结合,实现了地质体及工程模型与四面体网格模型的同约束多属性耦合,从而生成复杂地质条件下岩体工程开挖的准确数值计算模型。在三维环境下进行表面模型的构建,能够充分利用原有的各种地质资料,直观地进行交互式操作,简单易用。由该方法建立的数值计算模型能够较为真实地模拟岩层及地下工程开挖,从而提高了数值计算的可靠性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 胡斌,张倬元,黄润秋,等. Flac~(3d)前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1387—1391.
HU Bin, ZHANG Zhuo-yuan, HUANG Run-qiu, et al. Development of pre-processing package for FLAC3D and verification of its simulating effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1387—1391.
- [2] 廖秋林,曾钱帮,刘彤,等. 基于 ansys 平台复杂地质体 flac~(3d)模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010—1013.
LIAO Qiu-lin, ZENG Qian-bang, LIU Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC3D based on ANSYS platform[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1010—1013.
- [3] 徐能雄,武雄,汪小刚,等. 基于三维地质建模的复杂构造岩体六面体网格剖分方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 957—961.
XU Neng-xiong, WU Xiong, WANG Xiao-gang, et al. Approach to automatic hexahedron mesh generation for rock-mass with complex structure based on 3D geological modeling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 957—961.
- [4] 毕林,王李管,荆永滨. 多介质复杂结构条件下岩体工程开挖力学响应三维数值模拟技术[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 40—44.
BI Lin, WANG Li-guan, JING Yong-bin. Numerical simulation for rock engineering under multi-medium and complex structure[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 22(03): 40—44.
- [5] 罗周全,吴亚斌,刘晓明,等. 基于 surpac 的复杂地质体 flac~(3d)模型生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334—1338.
LUO Zhou-quan, WU Ya-bin, LIU Xiao-ming, et al. FLAC3D modeling for complex geologic body based on SURPAC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1334—1338.
- [6] 林杭,曹平,李江腾,等. 基于 surpac 的 flac~(3d)三维模型自动构建[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 339—342.
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. Automatic generation of FLAC3D model based on SURPAC[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(3): 339—342.
- [7] SI H, GÜRTNER K. Meshing piecewise linear complexes by constrained delaunay tetrahedralizations[C]//14th International Meshing Roundtable. 2005: Springer-Verlag.
- [8] SI H. On refinement of constrained delaunay tetrahedralizations[C]//Proceedings of the 15th International Meshing Roundtable. 2006.
- [9] SI H, TetGen, a quality tetrahedral mesh generator and three-dimensional delaunay triangulator, v1.3 User's Manual[R]. WIAS Technical Report, 2004.
- [10] SHEWCHUK J R. Constrained delaunay tetrahedralizations and provably good boundary recovery[C]//Eleventh International Meshing Roundtable. 2002.
- [11] PÉBAY P, THOMPSON D, SHEPHERD J, et al. New applications of the verdict library for standardized mesh verification pre, post, and end-to-End processing[C]//Proceedings of the 16th International Meshing Roundtable, 2008: 535—552.
- [12] PATRICK M K. Algebraic mesh quality metrics for unstructured initial meshes[J]. *Finite Elem. Anal. Des.*,

2003, 39(3): 217—241.