

DOI: 10.11779/CJGE201404026

岩质工程地质体三维球颗粒计算模型可视化建模

黄刚海^{1,2}, 焦玉勇^{1,2}, 张秀丽^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对难以用离散数值方法建立复杂地质体计算模型的问题, 以 VC++ 基础类库 (MFC) 为开发平台, 编写三维球颗粒数值计算模型建模程序。利用开放图形程序接口 OpenGL, 在程序中实现建模可视化。开发的地表开挖算法及坑道开挖算法可使模型形成复杂地表和各种坑道空间。建模实例表明程序具有建立大型复杂地质体球颗粒计算模型的能力, 可适应各种常见的工程地质体建模, 有助于促进 DEM、DDA 等离散数值方法在大型工程中的推广应用。

关键词: 地质体; 三维建模; 球颗粒; 可视化; DEM; DDA

中图分类号: P642; TP39.9; TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)04-0782-06

作者简介: 黄刚海(1986-), 男, 广西河池人, 博士研究生, 主要从事采矿与岩土工程数值方法方面研究工作。E-mail: huanganghai@163.com。

Visual modeling for 3D spherical particle for geological body model of rock engineering

HUANG Gang-hai^{1,2}, JIAO Yu-yong^{1,2}, ZHANG Xiu-li^{1,2}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to establish a model for complex geologic body for discrete numerical methods, based on the platform of Microsoft foundation Classes (MFC) in VC++, a procedure is developed to establish a three-dimensional spherical particle numerical model. By using the open graphic library OpenGL, the modeling is visualized in the procedure. Based on the surface-excavating algorithm and the tunnel-excavating algorithm, complex ground surface and various tunnel spaces can be obtained from the model. A modeling example indicates that it is able to establish a spherical particle model for large-scale complex geological body, suitable for the modeling of various kinds of common engineering geological bodies, and conducive to more application of discrete numerical methods like DEM and DDA in large-scale engineering.

Key words: geological body; 3D modeling; spherical particle; visualization; DEM; DDA

0 引言

利用计算机进行地质体可视化建模, 是为工程构建数值计算模型的重要基础。随着数值方法在工程中愈来愈广泛的应用, 复杂工程地质体计算模型建模方法逐渐成为热门研究课题^[1-6]。

近 10 年来, 离散单元法 (DEM)^[7]、非连续变形分析 (DDA)^[8] 等离散数值方法由于能够适应地质体的不连续性, 被广泛用于模拟各种不连续现象, 如岩体裂纹的萌生与发展^[9-11]、滑坡^[12]、爆破过程岩块的飞散^[13] 等。表明它们在岩土工程、地质工程等领域具有广泛应用前景。然而, 基于离散数值方法的商业程序, 尚难以建立复杂地质体计算模型, 这有碍于该数值方法在工程中的推广应用。目前关于复杂地质体计算模型建模方法的研究^[1-6] 主要针对连续数值方法, 面

向离散数值方法的建模技术仍需探索。

研究表明, 以简单实体为基本单元的计算模型, 可用于近似模拟实物的力学行为^[14]。球体是最简单的三维实体, 离散数值方法用其作为计算模型的基本块体可省去许多繁琐计算, 这使球颗粒计算模型生成算法在近几年成为颇受关注的研究课题^[15-17]。文献^[16]的算法先生成许多小球, 接着小球被放大至充满预定空间, 最后在重力作用下自然堆积成密实球颗粒模型; 该算法被应用于著名的颗粒流程序 PFC^{3D}^[18]。文献^[17]介绍了生成球颗粒的改进前进面算法, 以降低球颗粒模型建模耗时。总体上看, 既有研究主要侧重于如何

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2011CB710602); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-05-03)
收稿日期: 2013-07-24

高效地生成球颗粒, 较少介绍如何生成形状复杂的球颗粒模型。虽有不少学者致力于建模方面的努力, 但尚难以为离散型数值方法提供复杂球颗粒模型。因此, 研究如何生成复杂工程地质体球颗粒计算模型是很有必要的。

鉴于此, 笔者尝试利用 VC++ 基础类库 (MFC) 程序开发平台 编写球颗粒计算模型可视化建模程序, 为 DEM、DDA 等数值方法提供计算模型, 以进一步促进离散数值方法在大型工程中的应用。

1 程序构架及建模操作

建模程序的基本构架如图 1 所示。原始数据通过 MFC 文档类 (cdocument class) 转化成模型数据; 通过 MFC 视图类 (cview class), 模型被显示在计算机屏幕上。MFC 文档类中的模型数据可根据数值方法或商业软件的需要保存成相应格式的数据文件。MFC 视图类利用跨平台、跨编程语言且独立于硬件设备的图形程序接口 OpenGL 将模型绘制出来。由于 Windows 采用 GDI(graphics device interface) 在设备描述表 DC (device context) 上绘图, 而 OpenGL 要在渲染描述表 RC (rendering context) 上绘图; 为使 MFC 平台能用 OpenGL 绘制模型, 程序在创建了 DC 之后, 设置支持 OpenGL 的像素格式, 然后生成 RC, 让 RC 与 DC 关联起来。绘图结束后, 程序先解除 RC 与 DC 的关联, 然后删除 RC, 最后释放 DC。

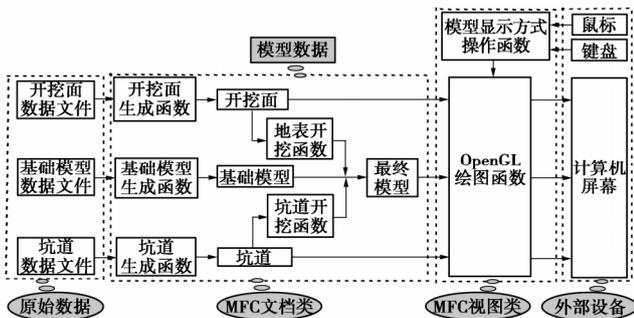


图 1 程序构架

Fig. 1 Program structure

程序的建模过程主要涉及 3 个部分。其一是原始数据, 为 txt 文件, 其中包含了建模所需的所有原始数据。其二是数据转化部分, 在 MFC 文档类中完成, 该部分体现了程序的建模思路。其三是模型显示部分, 在 MFC 视图类中完成, 负责将模型数据转化成图像显示在计算机屏幕上。程序建模的基本思想为: 先生成一个方形的球颗粒计算模型(称基础模型); 然后添加开挖面, 通过地表开挖函数对基础模型进行开挖以获得地表形状; 接着添加坑道, 通过坑道开挖函数实现模型的内部开挖; 最后将具有地表形状和内部开挖

空间的球颗粒计算模型导出。

程序采用下拉菜单交互式界面, 如图 2 所示。建模时, 通过点击菜单项或相应工具栏按钮来执行函数。MFC 文档类以弹窗方式打开原始数据文件获取模型原始数据。3 个原始数据文件通过 3 个生成函数, 分别被转化成基础模型、开挖面和坑道。开挖面和坑道分别通过两个开挖函数实现对基础模型的开挖。MFC 视图类不参与模型数据的运算, 仅负责调用 OpenGL 绘图函数在模型显示窗中绘制模型。通过模型显示方式操作函数, OpenGL 函数响应键盘和鼠标的操作, 可实现模型的平移、缩放、旋转、动画展示以及半透明显示, 可以隐藏模型中的部分或全部单元, 以便观察模型是否正确。

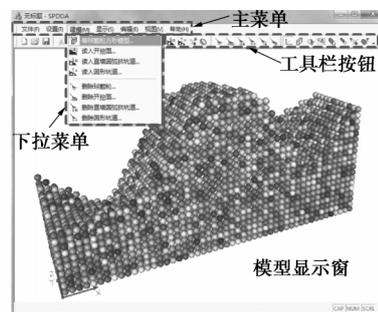


图 2 软件界面

Fig. 2 Software interface

2 核心算法

2.1 基础模型生成函数

基础模型生成函数的作用是生成一个长方体等球颗粒模型, 球颗粒按排、列、层堆积。球颗粒的层数、行数和列数由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} I &= (z_2 - z_1) / 2r \\ J &= (y_2 - y_1) / 2r \\ K &= (x_2 - x_1) / 2r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, I, J, K 取整, 分别为球颗粒的层数、行数和列数; $x_1 \sim x_2, y_1 \sim y_2, z_1 \sim z_2$ 分别为基础模型在笛卡尔坐标系 (X, Y, Z) 中的 3 个坐标范围; r 为球体半径 (基础模型数据文件提供 $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 和 r 的值)。

基础模型中球颗粒的球心坐标由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 + r(2k - 1) \\ y &= y_1 + r(2j - 1) \\ z &= z_1 + r(2i - 1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, x, y, z 为球心的 3 个坐标值; i, j, k 分别为球颗粒所在的层数、行数和列数 ($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$)。

2.2 地表开挖函数

开挖面数据文件包含大量地表点的坐标，开挖面生成函数按照一定方式将这些点连接起来形成空间三角网。这个三角网就是模型的开挖面，它代表工程地质体的地表。开挖面实际上是由一系列相互连接的三角面构成的空间曲面。

地表开挖函数的工作原理是：对于开挖面中的每个三角面，根据其3个顶点的坐标值，求出它的开挖空间 Ω ，将球心落在空间 Ω 内的球颗粒删除，达到在基础模型上形成地表的目的。

图3所示，不共线的3个点 $L(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ ， $M(x_{02}, y_{02}, z_{02})$ ， $N(x_{03}, y_{03}, z_{03})$ ，构成开挖面的一个三角面(记为 ΔLMN)。 Ω_1 和 Ω_2 是与 ΔLMN 相关的两个空间。空间 Ω_1 定义为以 ΔLMN 为正截面的三棱柱空间中距离 ΔLMN 小于 r 的部分，即图3(a)中浅黄色三棱柱空间；空间 Ω_2 定义为 ΔLMN 正上方(即 Z 轴正向)的无限长三棱柱空间，即图3(b)中淡紫色三棱柱空间。 ΔLMN 的开挖空间 Ω 定义为 Ω_1 和 Ω_2 的并集。下面推导球颗粒的球心 $O(x_0, y_0, z_0)$ 落在 Ω_1 和 Ω_2 内应分别满足的条件。

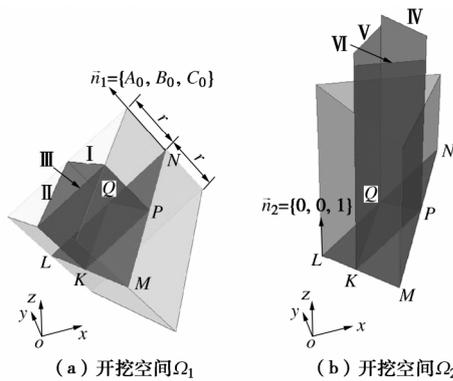


图3 三角面开挖空间

Fig. 3 Excavating space of a triangular face

(1) ΔLMN 所在平面的方程为

$$A_0x + B_0y + C_0z + D_0 = 0 \quad (3)$$

其中，向量 $\vec{n}_1 = \{A_0, B_0, C_0\}$ 为平面法向量。

$$A_0 = \begin{vmatrix} y_{01} & z_{01} & 1 \\ y_{02} & z_{02} & 1 \\ y_{03} & z_{03} & 1 \end{vmatrix}, \quad B_0 = - \begin{vmatrix} x_{01} & z_{01} & 1 \\ x_{02} & z_{02} & 1 \\ x_{03} & z_{03} & 1 \end{vmatrix},$$

$$C_0 = \begin{vmatrix} x_{01} & y_{01} & 1 \\ x_{02} & y_{02} & 1 \\ x_{03} & y_{03} & 1 \end{vmatrix}, \quad D_0 = - \begin{vmatrix} x_{01} & y_{01} & z_{01} \\ x_{02} & y_{02} & z_{02} \\ x_{03} & y_{03} & z_{03} \end{vmatrix}.$$

以下各个平面方程的求取方法与 LMN 平面方程的求法一致，不详细介绍。

(2) 图3所示，点 K ， P ， Q 分别为 ΔLMN 三

条边的中点。分别过 ΔLMN 的三条中位线作垂直于 ΔLMN 的平面，得平面、(见图3(a))。易求出3个平面的方程，结果记为

$$\left. \begin{aligned} &: A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \\ &: A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0, \\ &: A_3x + B_3y + C_3z + D_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(3) 当坐标 (x_0, y_0, z_0) 满足如下条件时，球心 O 落在空间 Ω_1 内。

$$\left. \begin{aligned} &|A_1x_0 + B_1y_0 + C_1z_0 + D_1| < d_1\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}, \\ &|A_2x_0 + B_2y_0 + C_2z_0 + D_2| < d_2\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}, \\ &|A_3x_0 + B_3y_0 + C_3z_0 + D_3| < d_3\sqrt{A_3^2 + B_3^2 + C_3^2}, \\ &|A_0x_0 + B_0y_0 + C_0z_0 + D_0| < r\sqrt{A_0^2 + B_0^2 + C_0^2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， d_1 为 N 到平面的距离， d_2 为 L 到平面的距离， d_3 为 M 到平面的距离。

(4) 分别过 ΔLMN 3条中位线作铅垂面，得平面、(见图3(b))。易求出3个平面的方程，结果记为

$$\left. \begin{aligned} &: A_4x + B_4y + C_4z + D_4 = 0, \\ &: A_5x + B_5y + C_5z + D_5 = 0, \\ &: A_6x + B_6y + C_6z + D_6 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(5) 当坐标 (x_0, y_0, z_0) 满足如下条件时，球心 O 落在空间 Ω_2 内。

$$\left. \begin{aligned} &|A_4x_0 + B_4y_0 + C_4z_0 + D_4| < d_4\sqrt{A_4^2 + B_4^2 + C_4^2}, \\ &|A_5x_0 + B_5y_0 + C_5z_0 + D_5| < d_5\sqrt{A_5^2 + B_5^2 + C_5^2}, \\ &|A_6x_0 + B_6y_0 + C_6z_0 + D_6| < d_6\sqrt{A_6^2 + B_6^2 + C_6^2}, \\ &(z_0 \geq -(A_0x_0 + B_0y_0 + D_0)/C_0), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， d_4 为 N 到平面的距离， d_5 为 L 到平面的距离， d_6 为 M 到平面的距离。

以上空间 Ω_2 的算法推导仅在 $C_0 \neq 0$ 时进行；当 $C_0 = 0$ 时， ΔLMN 为铅垂面，空间 Ω_2 为空。

从上述推导的地表开挖算法中可以看出，空间 Ω_2 的作用是将球心位于三角面以上空间的球体删除，相互连接的三角面可获得空间 Ω_2 的集合，能将地表以上的球颗粒删除；空间 Ω_2 不能将那些球心位于三角面以下但与三角面相交的球体删除，空间 Ω_1 可将这些漏判的球体开挖掉。

2.3 坑道开挖函数

为实现模型的内部开挖，以适应工程中各种地下坑道的情况，程序设置了坑道单元。鉴于多数地下坑道采用“直墙+弧形拱”横断面或圆形断面，程序开发了直墙圆拱坑道单元和圆形坑道单元。凡是横断面形状接近“直墙+圆拱”或圆形的地下空间结构，均可用坑道单元实现开挖。

坑道开挖函数的作用是：对于每一个坑道单元，求出其开挖空间，将球心落在空间内的球颗粒删除。坑道开挖空间定义为：半径为 r 的球体，若其球心 $O(x_0, y_0, z_0)$ 落在坑道内部，则该球体部分或全部落在坑道内部。

如图 4 所示。横断面为“直墙+圆弧拱”的地下坑道，已知坑道宽 $2W$ 、直墙高 H_1 、圆弧拱高 H_2 ($H_2 > W$) 以及坑道一端底板中点坐标 $P_1(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ 和另一端底板中点坐标 $P_2(x_{20}, y_{20}, z_{20})$ (坑道数据文件提供每个坑道单元的参数)。坑道无横坡 (即 $K_1 N_1$ 为水平线)。下面推导开挖空间的求取方法。

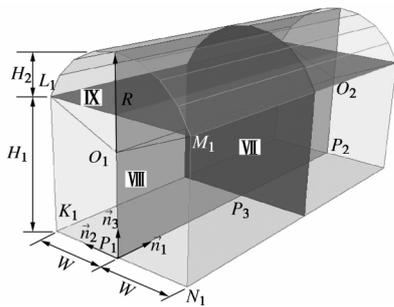


图 4 直墙圆弧拱坑道

Fig. 4 “Vertical wall + circular arch” tunnel

(1) 图 4 所示， P_3 为 $P_1 P_2$ 的中点，平面 π_1 为过 P_3 的坑道横断面，平面 π_2 为过 $P_1 P_2$ 的铅垂面 (由于坑道无横坡，故平面 π_2 恰好将坑道分成对称的两半)，平面 π_3 为位于坑道直墙顶部的平面。易求出平面 π_1 、 π_2 、 π_3 的方程，结果记为

$$\left. \begin{aligned} &: A_7 x + B_7 y + C_7 z + D_7 = 0 \\ &: A_8 x + B_8 y + D_8 = 0, \\ &: A_9 x + B_9 y + C_9 z + D_9 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中， $\vec{n}_1 = \{A_7, B_7, C_7\}$ 为坑道走向向量 $\overline{P_1 P_2}$ ， $A_7 = x_{20} - x_{10}$ ， $B_7 = y_{20} - y_{10}$ ， $C_7 = z_{20} - z_{10}$ ；向量 $\vec{n}_2 = \{A_8, B_8, 0\}$ 为水平向量 $\overline{P_1 K_1}$ 的单位向量； $\vec{n}_3 = \{A_9, B_9, C_9\}$ 为 $\overline{K_1 L_1}$ 的单位向量。

(2) 当坐标 (x_0, y_0, z_0) 满足如下条件时，球心 O 落在开挖空间内。

$$\left. \begin{aligned} &|A_7 x_0 + B_7 y_0 + C_7 z_0 + D_7| < \\ &0.5(A_7^2 + B_7^2 + C_7^2) + r\sqrt{A_7^2 + B_7^2 + C_7^2} \\ &|A_8 x_0 + B_8 y_0 + D_8| < W + r, \end{aligned} \right\} \\ A_9(x_0 - x_{12}) + B_9(y_0 - y_{12}) + C_9(z_0 - z_{12}) < 0 \\ |A_9 x_0 + B_9 y_0 + C_9 z_0 + D_9| < H_1 + r, \left. \right\} \quad (9)$$

or

$$\left. \begin{aligned} &A_9(x_0 - x_{12}) + B_9(y_0 - y_{12}) + C_9(z_0 - z_{12}) = 0 \\ &|\overline{OO_1} \times \overline{OO_2}| < (R + r) \cdot |\overline{O_1 O_2}|, \end{aligned} \right\}$$

式中， (x_{12}, y_{12}, z_{12}) 为点 L_1 的坐标， $z_{12} = z_{10} + C_9 H_1$ ， $y_{12} = y_{10} + B_8 W + B_9 H_1$ ， $x_{12} = x_{10} + A_8 W + A_9 H_1$ ； R 为坑道圆弧拱的半径， $R = 0.5(H_2 + W^2 / H_2)$ 。

对于圆形坑道，原始数据文件提供的参数为其半径和两端断面中心坐标，其开挖空间的求取方法较为简单，不做介绍。

3 建模举例

湖北大冶铜录山铜铁矿 1 号矿体露天开采已达设计境界，残矿需用地下开采。该矿体围岩主要为斜长石岩、砂卡岩，稳固性较差；由于汛期未能及时排水，露天坑积蓄大量水体；矿体上盘受一断层影响，断层贯穿露天坑，可能导水。恶劣的开采环境对残矿的安全回收产生较大影响，在设计地下开拓系统时须进行各种稳定性论证。基于该情况，拟用本研究的建模程序建立露天边坡模型，并设计浅部的地下开拓系统。下面用建模程序对露天坑周边地质体建立球颗粒计算模型。

(1) 生成基础模型。图 5 所示，基础模型坐标范围为 $x = -50 \sim 50$ ， $y = -50 \sim 50$ ， $z = -50 \sim 50$ ，球颗粒半径 $r = 0.5$ 。

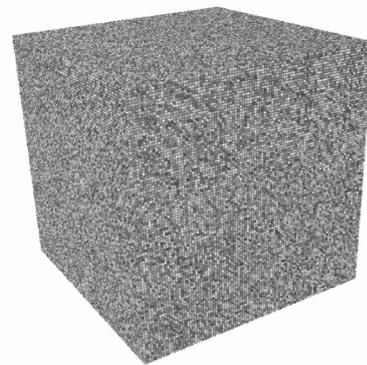


图 5 基础模型

Fig. 5 Basic model

(2) 生成开挖面和坑道。图 6 所示，土黄色曲面为模型的开挖面，代表地质体地表，有天然地表和人工开挖形成的露天边坡。图中绿色结构为直墙圆弧拱坑道，有各种平巷、硐室 (地下采场和矿仓)、斜坡道等地下结构；紫色结构为圆形坑道，有提升竖井、回风井、溜矿井等地下井筒结构。

(3) 获得最终模型。图 7 所示，通过地表开挖函数及坑道开挖函数的开挖作用，长方体基础模型被开挖成具有复杂地表并带有各种地下空间的球颗粒模型。离散数值方法可用该计算模型进行露天边坡及境界矿柱稳定性分析，也可用于分析设计的开拓工程是否安全。

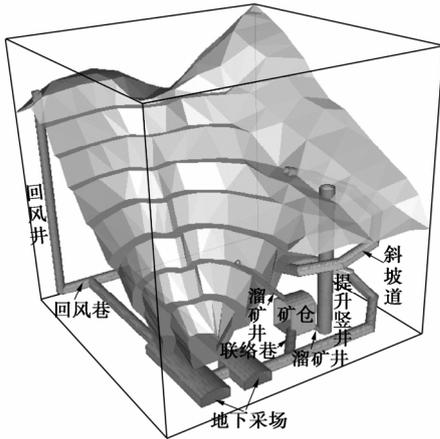


图6 开挖面及坑道

Fig. 6 Excavating face and tunnels

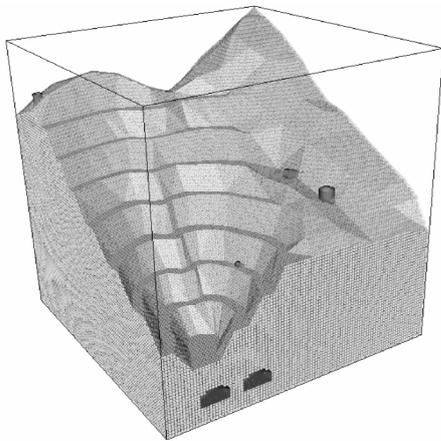


图7 最终模型

Fig. 7 Final model

4 结论与讨论

鉴于离散数值方法在工程中具有广泛应用前景,但难以为其提供复杂地质体计算模型的情况,基于VC++基础类库(MFC)程序开发平台,编写了完全独立于其他建模软件的工程地质体球颗粒计算模型建模程序。利用开放图形程序接口OpenGL实现建模可视化;采用下拉菜单交互式界面,建模操作简单、直观,模型展示美观。程序的模型数据可根据数值方法或软件的需要较为灵活地保存成相应格式的模型文件。开发的地表开挖算法可以生成极其复杂的地表,两种坑道单元基本上可以近似地适用于工程中的大多数地下空间结构,使建模程序可适应各种常见的工程地质体建模,有助于DEM、DDA等离散数值方法在大型工程中的推广应用。

开发的程序是初级版本,侧重考虑的是形成完整的程序框架,如数据的输入、模型的展示与模型数据的导出等。为使计算模型能够适应不同类型的地质体,

还应在程序中实现更多的球颗粒堆积模式(如非等球颗粒的随机堆积等),充分考虑球颗粒的级配、密实度等多方面的因素,使程序能够为不同的地质体类型建立最合适的球颗粒计算模型。这是本研究下一步工作应该研究的内容。

参考文献:

- [1] 李新星, 朱合华, 蔡永昌, 等. 基于三维地质模型的岩土工程有限元自动建模方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 855-862. (LI Xin-xing, ZHU He-hua, CAI Yong-chang, et al. Automatic modeling method of numerical analysis in geotechnical engineering based on 3D geologic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 855-862. (in Chinese))
- [2] 徐能雄. 适于数值模拟的三维工程地质建模方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1710-1716. (XU Neng-xiong. 3D engineering geological modeling method suitable for numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1710-1716. (in Chinese))
- [3] 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 FLAC^{3D} based on ANSYS platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1010-1013. (in Chinese))
- [4] 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 FLAC^{3D} model based on SURPAC [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(3): 339-342. (in Chinese))
- [5] 王树人, 张海清. MIDAS/GTS-FLAC^{3D}耦合建模新方法及其应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 12-17. (WANG Shu-ren, ZHANG Hai-qing. A coupling modeling method with MIDAS/GTS-FLAC^{3D} and its application[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 12-17. (in Chinese))
- [6] 荆永滨, 王李管, 贾明涛, 等. 基于TetGen的复杂FLAC^{3D}模型可视化建模方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2655-2660. (JING Yong-bin, WANG Li-guan, JIA Ming-tao, et al. Visual modeling of complex FLAC^{3D} model based on TetGen [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2655-2660. (in Chinese))

- Chinese))
- [7] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47 – 65.
- [8] SHI G H. Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of block systems[D]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1988.
- [9] JING L R, MA Y, FANG Z L. Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, **38**(3): 343 – 355.
- [10] SCHOLTES L, DONZE F V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, **52**(2): 18 – 30.
- [11] JIAO Y Y, ZHANG X L, ZHAO J. A two-dimensional DDA contact constitutive model for simulating rock fragmentation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2012, **138**(2): 199 – 209.
- [12] WU J H, CHEN C H. Application of DDA to simulate characteristics of the Tsaoing landslide[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(5): 741 – 750.
- [13] NING Y J, YANG J, MA G W. Modelling rock blasting considering explosion gas penetration using discontinuous deformation analysis[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, **44**(4): 483 – 490.
- [14] FENG Y T, HAN K, OWEN D R J. Filling domains with disks: an advancing front approach[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, **56**(5): 699 – 713.
- [15] HAN K, FENG Y T, OWEN D R J. Sphere packing with a geometric based compression algorithm[J]. *Powder Technology*, 2005, **155**(1): 33 – 41.
- [16] CUI L, O’SULLIVAN C. Analysis of a triangulation based approach for specimen generation for discrete element simulations[J]. *Granular Matter*, 2003, **5**(3): 135 – 145.
- [17] LIU J, GENG Q D. Three-dimensional particles generation algorithm[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2011, **51**(2): 236 – 243.
- [18] Itasca Consulting Group, Inc. Particle Flow Code 3D, version 4.0[R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2007.