

岩体结构三维构模技术及其可视化系统研制

A study on 3D modeling techniques and visual system of rock mass structure

徐能雄^{1,2}, 何满潮^{1,2,3}, 景海河^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技学院 土木工程系, 黑龙江 哈尔滨 150027;
3. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083)

摘要: 根据岩体的构造特征, 将岩体内部划分成两大类四种基本类型的构造单元, 即连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体、褶皱型岩体、侵入型岩体, 并建立相应的空间数据模型。利用柱体构模、表面构模、单轮廓断面构模、多轮廓断面构模技术分别进行这四种类型岩体的三维构模。在此基础上, 开发岩体结构三维可视化构模系统。

关键词: 岩体; 三维; 构模; 可视化; GIS

中图分类号: TU 454 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2004)03-0373-05

作者简介: 徐能雄(1971-), 男, 博士, 副教授, 从事岩土体的三维可视化构模技术与 GIS 应用研究。

XU Neng-xiong¹, HE Man-chao^{1,2,3}, JING Hai-he^{1,2}

(1. School of Engineering & Technology, China University of Geoscience Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China; 3. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the structure characteristics, rock mass can be divided into four kinds of structure elements, including continuous rock mass (unfolded), faultage rock mass (unfolded), folded rock mass and intrusive rock mass, and corresponding spatial data models are built. Pillar Modeling Method, Surface Modeling Method, Single outline Section Modeling Method and Multi-outline Section Modeling Method are developed for building these four kinds of structure elements. A 3D modeling system is developed.

Key words: rock mass; 3D; modeling; visualization; GIS

0 引言*

岩体的构造特征(如:节理、断层、弱面、层面等)是决定岩土工程稳定性的重要因素。在岩土工程中,与工程稳定性相关的问题可以分成两大类,即:力学问题与地质问题。土力学经过一百多年的发展,已经形成了系统的基础理论体系和解决工程实际问题的方法。岩石力学、岩体力学的基础理论与分析方法也得到了逐步完善。但是,由于岩土工程的复杂性,土力学、岩石力学、岩体力学等在解决工程问题时还存在一定的不足。特别是岩体力学,“声誉很高,信誉尚低”,问题的关键在于岩体力学的理论与岩体的地质实际脱节^[1]。因此,对岩体的地质问题的研究,是岩土工程稳定性分析过程中必不可少的重要环节。

三维 GIS 构模方法可以清晰地展现岩体的构造特征,为岩土工程稳定性分析提供依据。近年来,三维 GIS 技术受到工程界的密切关注,是当前岩土工程研究的热点问题。三维 GIS 是进行地学构模的重要方法,国内外许多专家学者对这一技术进行了深入研究^[2],在基础理论与方法上取得了很大的进展,开发了一些三维地学构模软件^[3~11]。然而由于岩体结构的复杂性,试图寻找某种统一的构模方法来解决所有岩体的构模问题是非常困难的。

本文根据岩体的构造特征,将岩体划分成具有不同结构的构造单元;针对不同构造单元,建立空间数据模型,并将体划分方法与面向对象的空间数据模型相结合,实现多种数据模型的集成;利用柱体构模、表面构模、单轮廓断面构模、多轮廓断面构模技术分别进行连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体、褶皱型岩体与侵入型岩体的三维构模。在此基础上,开发岩体结构三维可视化构模系统。

1 岩体结构三维构模技术

1.1 岩体结构单元类型及其特征

岩体的构造特征复杂多变,但其构造单元的类型却有限。根据岩体结构的几何特征,从三维构模的角度上,将岩体划分成两大类四种基本类型(图 1),即:层状岩体与非层状岩体,层状岩体又可以分成连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体与褶皱型岩体,非层状岩体指侵入型岩体^[9~11]。

根据上述基本类型划分,可给出四种基本结构单元的定义。连续型非褶皱岩体是指岩层呈连续层状分布,没有被断层或节理切割,岩层界面为单值曲面的岩

* 基金项目:国家自然科学基金委重大项目(50490270);国家自然科学基金委创新群体基金资助项目(50221402)

收稿日期:2003-12-05

表 1 四种基本结构单元的几何特征

Table 1 Geometric characteristics of four kinds of basic structure elements

结构单元	几何特征
连续型非褶皱岩体	(1) 岩体可以按照一定的划分标准划分成多个岩层,称岩层子体; (2) 岩层子体在研究区域内是连续分布的; (3) 岩层子体由上、下两界面封闭而成,上、下界面在水平面上的投影完全重合; (4) 在研究范围内,任一平面点 $P(x, y)$, 在上层界面或下层界面上对应的 Z 值是唯一的,即单值性; (5) 相同性质的岩层子体可能重复出现。
断裂型非褶皱岩体	(1) 岩体可以按照断裂的切割情况划分成多个块体,称为子体;子体又可以根据一定的划分标准划分成多个岩层,称为岩层子体; (2) 岩层子体是层状分布的,由两个平行或近于平行的界面所限制; (3) 研究区域内存在一条或多条断裂,使得岩层不再连续分布; (4) 在同一岩层子体内,任一平面点 $P(x, y)$, 在上层界面或下层界面上对应的 Z 值是唯一的,即单值性; (5) 岩层子体由上下层面、断裂面、边界面封闭而成。
褶皱型岩体	(1) 岩体可以按照断裂的切割情况划分成多个块体,称为子体;子体又可以根据一定的划分标准划分成多个岩层,称为岩层子体; (2) 岩层子体不再呈近似水平层状分布,可以呈垂直层状、倾斜层状分布。这样的分布特点使得岩层的层序发生了变化,在同一模型中,层序是不一致的; (3) 岩层子体的界面可能是非单值的,即平面上一点 $P(x, y)$, 在上层界面或下层界面上对应的 Z 值可能不再唯一。
侵入型岩体	(1) 岩体呈非层状分布; (2) 用任意一组平行剖面切割岩体,至少有一个剖面上的轮廓线数大于 1。

体;断裂型非褶皱岩体是指岩层呈层状分布,被一条或多条断裂切割,岩层界面为单值曲面的岩体;褶皱型岩体是指岩层呈层状分布,被一条或多条断裂切割,有一组或多组岩层界面是多值曲面,并且可找到一组平行剖面,在每个剖面上只有一条岩体轮廓线的岩体;侵入型岩体是指岩层呈非层状分布,用任意一组平行剖面切割岩体,至少有一个剖面上的轮廓线数大于 1。通过实例分析,可得到四种基本结构单元的几何特征(见表 1)。

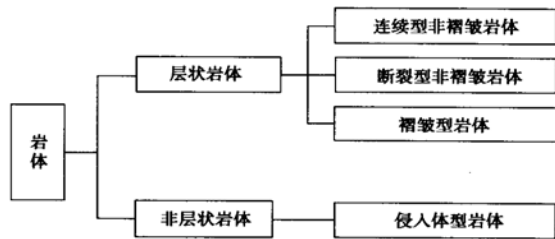


图 1 岩体内部构造单元的类型

Fig. 1 Types of structure elements in rock mass

1.2 岩体结构单元构模方法

1.2.1 连续型非褶皱岩体构模方法

连续型非褶皱岩体构模可以采用柱体构模技术。柱体构模就是根据一定的划分标准(如岩性、地层等),将岩体划分成不同的岩层子体,然后将各岩层子体细分成微柱体元,通过微柱体元来组织存储数据,每个柱体由位于上下层界面上的多边形面与几个垂直于水平面的侧面组成。本文中微柱体元是三棱柱。

1.2.2 断裂型非褶皱岩体构模方法

断裂型非褶皱岩体构模可以采用表面构模技术。

所谓表面构模就是用多个面组成的封闭空间来表示空间实体。表面构模的基本方法就是将岩体按断裂划分成不同的子体,然后将各个子体按一定的划分标准(如地层年代、岩性等)划分成不同的岩层子体,每个岩层子体又由岩层界面、断裂面与边界面围成。在形成各岩层子体后,再将它们集中起来就可以得到总的岩体模型。

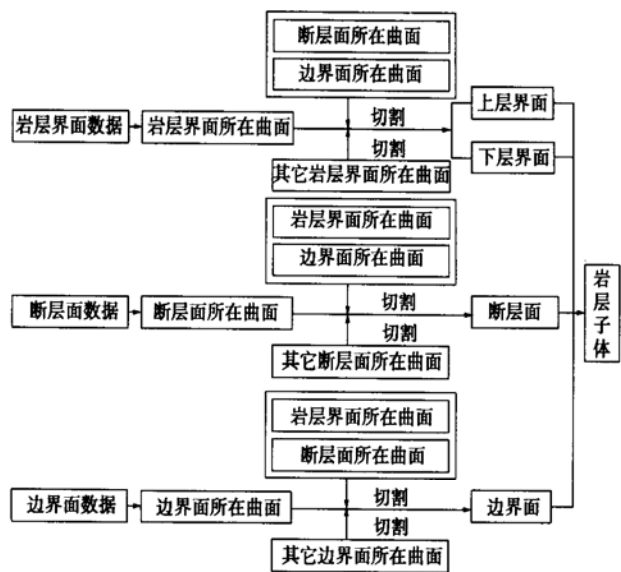


图 2 断裂型非褶皱岩体表面的形成过程

Fig. 2 Forming process of faultage rock mass(unfolded)

在构模过程中,断层面一般通过钻孔数据,拟合断层面方程而得到断层面所在曲面。边界面由一组垂直于水平面的平面组成,通过边界线方程可得到边界面

所在的曲面。岩层子体上下界面通过钻孔数据进行插值, 得到上下界面所在的曲面。由这些曲面进行相互切割, 就可以得到断面面 边界面与上下界面。图 2 为断裂型非褶皱岩体表面的形成过程。

1.2.3 褶皱型岩体构模方法

在岩体中, 当出现褶皱时, 岩层界面可能不再是单值曲面, 不能使用插值曲面来表示。本文根据褶皱岩体的结构特征, 采用单轮廓断面构模技术来进行褶皱岩体的构模。单轮廓断面构模就是先按照一定的标准 (如: 岩性 地层年代等), 将岩体划分成一系列子体; 然后选取某一方向为岩体的主轴方向, 沿主轴方向从岩体中截取一系列平行断面; 再形成各子体在所有断面上的轮廓线, 利用相邻轮廓线之间的三维形体重构技术, 按顺序连结各子体的相邻轮廓线形成封闭侧面, 最后加上端面就构成了模型体。

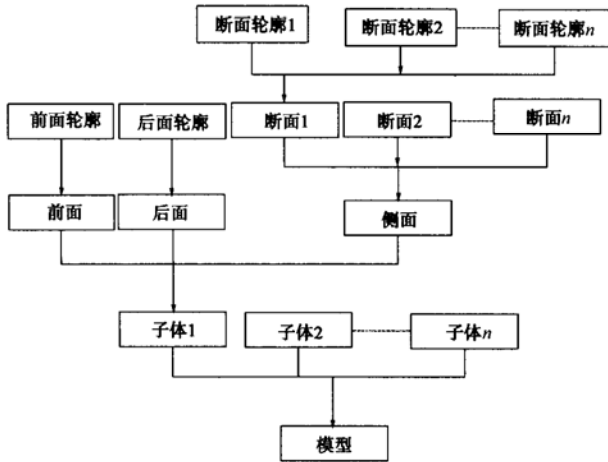


图 3 单轮廓断面构模过程

Fig. 3 Modeling process of Section Modeling Method with single outline

在单轮廓断面构模开始时, 应进行数据概化, 将模型划分成多个子体。每个子体由一组断面轮廓线进行三维重构形成侧面, 然后根据前面轮廓与背面轮廓形成端面, 组合侧面与端面就可以形成子体, 多个子体的结合成为模型总体。图 3 为单轮廓断面构模过程。

1.2.4 侵入型岩体构模方法

侵入型岩体的结构复杂多变, 无规律可循, 这种岩体的构模可以采用多轮廓断面构模技术。这里采用 M. W. Jones 等人提出的将多条轮廓线之间的表面重构问题转化为体数据中的等值面构造问题的方法。该方法无需预先判断轮廓线间的相互对应关系及分支关系, 而且也适用于非凸轮廓线。

将多条轮廓线之间的表面重构问题转化为体数据中的等值面构造问题的方法如图 4 所示, 其主体部分为体数据的构造。进而侵入体三维构模问题转化成侵

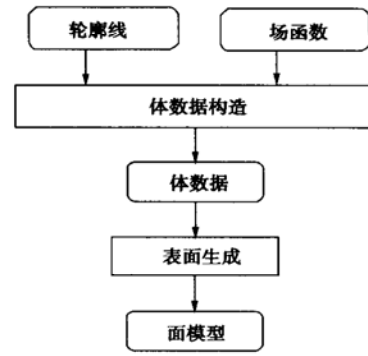


图 4 多轮廓断面构模

Fig. 4 Section Modeling Method with multi-outlines

入体的体数据构造问题。

1.3 岩体结构单元空间数据模型

空间数据模型是三维 GIS 构模的基础。本文首先在岩体内部构造单元划分的基础上, 形成单一构造单元的空间数据模型; 然后探讨具有不同数据模型的构造单元之间的组合方式, 形成混合数据模型, 使之与具有复杂结构的工程岩体相对应。具体分析如下:

(1) 单一构造单元的空间数据模型

根据岩体内部构造单元的划分方法, 对应每一种类型的构造单元可以建立各自的空间数据模型。根据构造单元的几何特征, 本项研究拟采用的单一构造单元的空间数据模型如表 2。

(2) 多种构造单元数据模型的集成方法

从表 2 中单一构造单元的空间数据模型可以看出, 不同构造单元的数据模型不同。然而, 在实际情况下, 岩体由不同构造单元组合而成。因此, 探索不同数据模型的组合方法是必要的。本文将体划分与面向对象数据模型相结合, 形成混合数据模型。具体实施过程: 首先按照一定的尺度标准, 将研究空间划分成具有相同尺寸的规则立方体, 并将每一规则立方体称为混合子体; 针对每个混合子体, 划分出构造单元, 采用面向对象的方法建立不同构造单元的数据模型, 并通过增加类型标识属性进行存储就可以实现工程岩体构造单元数据模型的集成。

2 可视化构模系统

2.1 系统的组成

该系统由建模分析、通用工具与数据库三个部分组成。其中建模分析部分又由柱体构模、表面构模、单轮廓断面构模与多轮廓断面构模组成。通用工具是构模过程中所用到的工具, 如: 三角剖分、插值计算、等值线等。支持该系统的数据库包括三个部分: 属性数据库、空间数据库与数据文件。

表 2 单一构造单元的空间数据模型

Table 2 Spatial data model for each kind of structure element

类别	构造单元	空间数据模型	空间数据模型的基本特征
层状岩体	连续型非褶皱岩体	柱体模型	将岩体划分成许多柱体,称微柱体元,利用微柱体元来组织数据。
	断裂型非褶皱岩体	TIN 面模型	将岩体当作由岩层界面、断裂面、边界面围成的封闭空间,岩层界面、断裂面、边界面可以用 TIN 面构筑,利用 TIN 单元来组织数据。
	褶皱型岩体	单轮廓断面模型	在岩体中截取一系列断面,形成断面轮廓线,借助单轮廓线的三维重构方法可以重构三维形体。因此,可以利用单轮廓线组织数据。
非层状岩体	侵入体型岩体	多轮廓断面模型	在岩体中截取一系列断面,形成断面轮廓线,借助多轮廓线的三维重构方法可以重构三维形体。因此,可以利用多轮廓线组织数据。

2.2 系统的功能

系统的主要功能是进行岩体的三维建模与三维图形的可视化,并围绕主要功能开发一系列辅助功能。图 5 为系统的主菜单。现将按系统主菜单进行简要描述。



图 5 系统主菜单

Fig. 5 Main menu of system

(1) 图层

如图 6(a) 所示,图层操作用于添加图层、删除图层与选择图层。通过添加图层,可以从数据库中读取数据,并在窗口中显示图形,同时还可以删除图层与选择图层。该菜单项对于左右两窗口均可用,当点击左窗口时,可以操作二维图形数据,当点击右窗口时,可以操作三维图形数据。

(2) 工具

系统提供了网格剖分、插值、等值线制作、TIN 面制作与剖面制作等通用工具,如图 6(b) 所示。其中网格剖分支持交互式人机对话,用户可以用鼠标画模型边界与内部约束,也可以读入边界,还可以修改内部结点。插值方法有多种,该系统中提供了 Kriging 与 IDW 两种,针对不同情况可以选择不同的插值方法。等值线是为求取曲面之间交线设置的。

(3) 构模

构模是该系统的主体,包括柱体构模、表面构模与断面构模(包括单轮廓与多轮廓),如图 6(c) 所示。由于不同构模方法的数据结构、构模技术不同,系统形成了相互独立的 3 个构模子系统。

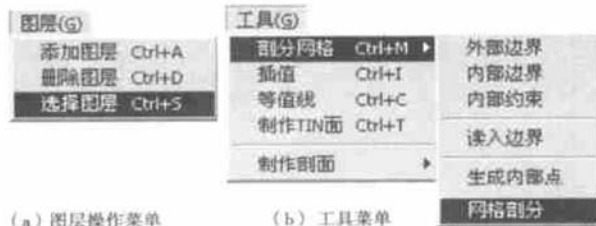
这 3 个子系统均提供了数据处理、数据组织、模型构筑、图形显示与三维空间数据操作等功能。

(4) 设置

该菜单项主要提供针对 OpenGL 的图形参数的设置,如图 6(d) 所示。利用该菜单可以进行颜色、光照、材质、高光、雾化设置,同时还提供了图形的移动、缩放

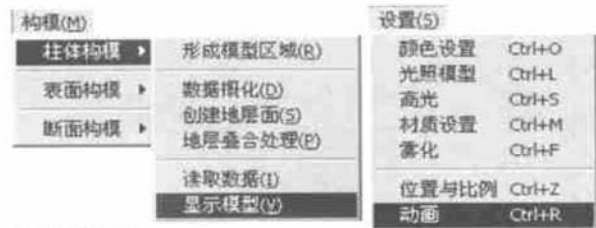
功能,还可以进行动画显示。

三维图形的效果如何,很大程度上由这些参数的设置决定,良好的参数设置可以使三维图形变得非常逼真。



(a) 图层操作菜单 (a) Map layer menu

(b) 工具菜单 (b) Tool menu



(c) 构模菜单

(c) Modeling menu

(d) 图形设置菜单

(d) Map setting menu

图 6 系统菜单

Fig. 6 Menu of system

2.3 系统的开发

该系统以 Microsoft Visual C++ 6.0 为开发平台,建立了面向对象的构模方法,充分利用组件技术,开发了一系列组件,并利用 OpenGL 技术实现三维图形的可视化。

面向对象技术封装了同类对象的属性与方法,同类的不同对象的区别在于属性的不同,并由此导致不同的操作结果。在该系统中,建立了 4 种不同的三维构模类,即柱体构模类、表面构模类、单轮廓断面构模类与轮廓断面构模类,分别用来解决连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体、褶皱型岩体与侵入型岩体的构模问题。

组件技术是目前流行的编程技术,它将复杂的功能分解成许多功能简单、形式独立的部分,可以在不同环境中重复利用。在该系统中,大量运用了组件技术,

如: 剖分、插值、等值线、二维轮廓线的三维重构等。

OpenGL 在三维图形制作方面具有独到的优势, 它提供了 100 多个核心函数与 31 个辅助函数, 这些函数提供了图形制作接口。它可以用来进行三维形体的绘制、颜色的设置、光照设置等。另外, 它支持在 C 语言环境下编程, 这为与其它技术的融合提供了极大的方便。

2.4 构模实例

图7~ 图10 分别为连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体、褶皱型岩体与侵入型岩体模型实例。

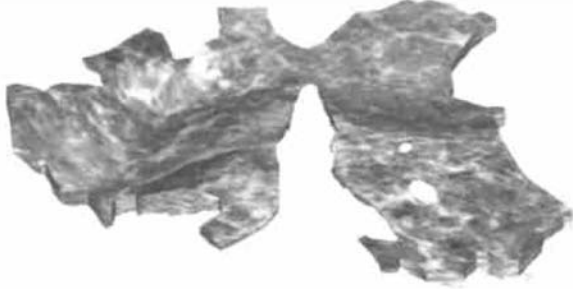


图7 连续型非褶皱岩体模型示例

Fig.7 Model example of continuous rock mass (unfolded)

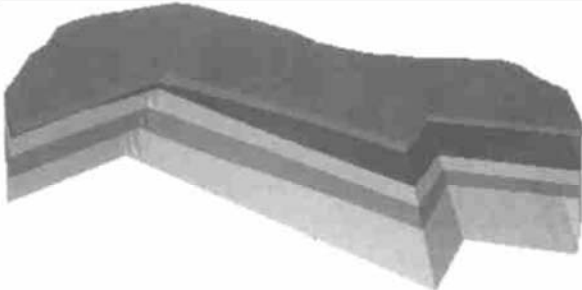


图8 断裂型非褶皱岩体模型示例

Fig.8 Model example of faultage rock mass (unfolded)

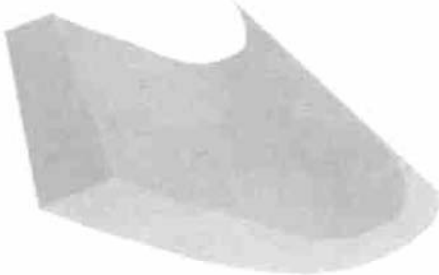


图9 断裂型非褶皱岩体模型示例

Fig.9 Model example of folded rock mass

3 结 语

岩体结构特征对岩土工程稳定性具有重要影响,



图10 侵入型岩体模型示例

Fig.10 Model example of intrusive rock mass

清晰地描述岩体有助于进行稳定性分析。然而, 岩体结构复杂多变, 很难利用某种单一的构模方法来进行描述。本文根据对大量实例的分析结果, 将岩体划分成两大类四种基本类型, 即: 层状岩体与非层状岩体, 层状岩体又可以分成连续型非褶皱岩体、断裂型非褶皱岩体与褶皱型岩体, 非层状岩体一般指侵入型岩体。在此基础上, 开发了岩体结构三维可视化构模系统。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] Mark Jessel. Three-dimensional geological modeling of potential field data[J]. Computer & Geosciences, 2001, 27(4): 455- 465.
- [3] Dobson J E. Commentary: A Conceptual Framework for Integrating Remote sensing[J]. GIS and Geography, PE&RS, 1993, 59(10): 1491- 1496.
- [4] Molenaar M. A Topology for 3D Vector Maps[J]. ITC Journal 1992, (1): 25- 33.
- [5] Arnaud de la Losa, Bernard Cervelle. 3D Topological modeling and visualisation for 3D GIS[J]. Computers & Graphics, 1999, 23: 469- 478.
- [6] Ross R Moore, Scott E Johnson. Three- dimensional reconstruction and modeling of complexly folded surfaces using Mathematica[J]. Computer & Geosciences, 2001, 27(4): 401- 418.
- [7] Lees J M. Xmap8: Three dimensional GIS for geology and geophysics[J]. Seismological Research Letters, 1995, 66(4): 33- 37.
- [8] Lees J M. Geotouch: software for three and four dimensional GIS in earth sciences[J]. Computer & Geosciences, 2000, 26(7).
- [9] 徐能雄. 工程岩体三维构模技术及其可视化系统研究博士学位论文[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2002.
- [10] 何满潮, 刘 斌, 徐能雄. 工程岩体三维可视化构模系统的开发[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1).
- [11] 徐能雄, 何满潮. 褶皱岩体三维可视化构模技术及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 418- 421.