

文章编号: 1000-7598-(2003) 04-0618-05

三维弹粘塑性块体元法分析软件的面向对象开发

陈士军, 陈胜宏

(武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 介绍了三维弹粘塑性块体元理论的基本原理。用 VC++ 和 AVS 编制了块体元法分析软件, 实现了人机交互功能。该软件集成了块体元分析的前处理、应力应变分析和后处理三大模块, 给出了一种应用于该分析理论的科学计算可视化的有效途径。通过算例, 验证了软件的实用性。

关 键 词: 弹粘塑性; 块体元法; 面向对象技术; 可视化; AVS

中图分类号: TV314 文献标识符: A

Software development of 3-D elastic-viscoplastic block element method using object oriented technology

CHEN Shi-jun, CHEN Sheng-hong

(School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The principle of 3-D elastic-viscoplastic block element method is introduced; and corresponding analysis software is compiled by using VC++ and AVS; and the man-machine interaction function is realized. This software integrates the preprocessor, stress and strain analysis and post processor into a whole system, and presents a feature of data visualization in scientific computation. Finally, a typical example is provided to approve the validity and the practicability of this software.

Key words: elastic-viscoplasticity; block element method; object oriented technology; visualization; AVS

1 引 言

在岩石地基和边坡工程中, 岩体被许多大尺度的断层或夹层等结构面切割成块体系统, 结构面成为稳定和变形的主要控制因素。不连续岩体的弹粘塑性块体理论及对应的分析方法, 考虑了结构面的变形与强度特性, 采用面接触假定, 建立块体变形与稳定的基本方程, 比较适合于正常工作和受承载力极限状态控制的岩体变形和稳定分析。

应用该理论进行岩体变形和稳定性分析, 需要的计算代价较小, 却能得到满足于精度要求的计算结果, 是一种比较实用的方法。为建立功能完备的块体元法分析系统, 提高理论的实用性, 本文提出了应用面向对象技术开发三维弹粘塑性块体元法分析软件系统(WBlock)的思想, 实现了前后处理功能。通过例题验证了该分析软件的可靠性和实用性。

2 弹粘塑性块体单元法的基本原理

块体单元理论分析的基本单元是任意形状的多面体(甚至可以是内部有孔洞的凹块), 基本未知量为多面体内部某种特定点(一般取为形心)的广义位移。它假定岩石块体为刚体, 只考虑结构面的变形和强度特性, 建立块体系统的整体平衡方程、结构面的变形与块体位移的几何相容方程, 以及结构面的弹粘塑性本构方程, 在此基础上, 可推导出求解块体系统的位移与稳定的基本方程。其主要思路如下^[1, 2]:

(1) 积分块体各面上的应力并向块体的形心简化, 在整体坐标系中写出块体的平衡方程:

$$\{\Delta F\}_{bi} - \sum_{j=1}^{nsi} J(j) \iint [P]_j \{\Delta \sigma\}_j dx_j dy_j = 0$$
$$(bi = 1, 2, \dots, bn) \quad (1)$$

收稿日期: 2002-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (59979021, 50239070)

作者简介: 陈士军, 男, 1978 年出生, 硕士生, 主要从事水工结构和岩土工程的数理模拟方法研究。

联系人及通讯地址: 陈胜宏, 武汉大学水电学院, 邮编: 430072。

两相邻块体的位移增量将在其公共面上引起相对变位。由运动学原理推出两者关系为:

$$\{\Delta\delta\}_j = J(j)[L]_j \left([M]_{b_i} \{\Delta U\}_{b_i} - [M]_{b_j} \{\Delta U\}_{b_j} \right) \quad (2)$$

(2) 根据一般的弹粘塑性势理论, 采用显格式时步离散, 在结构面上的应力与变位关系为:

$$\{\Delta\sigma\}_j = [D]_j \{\Delta\delta\}_j + \{\Delta\sigma^v\}_j \quad (3)$$

$$\text{式中} \quad \{\Delta\sigma^v\}_j = -\gamma_j \langle F_j \rangle [D]_j \left\{ \frac{\partial F_j}{\partial \{\sigma\}_j} \right\} \Delta t \quad (4)$$

(3) 将式(2)、(3)代入式(1), 整理可得块体系统的整体平衡方程:

$$[K] \{\Delta U\} = \{\Delta F\} + \{\Delta F^v\} \quad (5)$$

式中 $\{\Delta F\}$, $\{\Delta U\}$ 分别是块体系统的荷载和位移增量。

(4) 在任何时间步, 首先由式(5)解出块体形心位移增量 $\{\Delta U\}$; 再用式(2)计算结构面上的变位增量 $\{\Delta\delta\}_j$; 接着用式(3)计算结构面上的应力增量 $\{\Delta\sigma\}_j$; 从式(1)和(4)求出等效荷载增量 $\{\Delta F^v\}_j$ 和粘塑性应力增量 $\{\Delta\sigma^v\}_j$ 后, 即转入下一时步的重复计算。若某些结构面材料强度降到一定值时, 计算发散, 则说明某些块体或块体组合已不能维持平衡, 据此, 即得出该块体或块体组合的安全系数。

3 面向对象技术与 AVS 的可视化功能

随着现代计算软件规模的扩展和功能的完善, 传统的面向过程的程序设计方法已经难以担当重任。采用面向对象的程序设计方法, 可以很好的解决以往由于软件系统庞大而导致扩充困难的问题, 使已有的程序得到有效的再利用, 缩短软件的升级周期。由于采用了面向对象的编程技术, AVS 能够方便快捷的实现高级的数据可视化功能。

Advanced Visual Systems (简称 AVS) 公司创立于 1992 年, 是享誉世界的可视化软件供应商。AVS 运用计算机图形学和图像处理技术, 将数据转换为图形或图像在屏幕上显示出来, 并进行交互处理。其核心产品是 AVS/ Express 开发版^[3], 它提供了一个适合于多种平台的可视化应用的开发环境。利用面向对象的可视化编程环境, 开发者可以快速地进行交互式图形应用, 以便在开放和可扩充的环境中, 处理大量数据问题。

块体元法分析的单元是任意形状的多面体。对于这种单元, 目前, 尚无较好的一般性的图形显示方法。笔者将块体分解为多边形面, 进而分解为多

段直线, 构成直线段网格系统, 并采用 AVS 的非结构化网格, 成功地显示出块体整体系统及任意单个块体或块体组合的形状, 为后处理中位移、应力信息的可视化提供了基础。WBlock 就是集成了由 AVS 开发版导出的可视化模块类 AUCDFileReader 及 AViewer3D, 实现了脱离 AVS 软件环境独立运行的效果。其中, 类 AUCDFileReader 的声明如下:

```
// Reads in a UCD file and outputs fields
class AUCDFileReader : public OMXgroup {
public:
    AUCDFileReader(OMObj_id id = OMInst_obj,
        const char *name = NULL,
        int mode = OMX_CREATE_NEW_OBJ,
        OMXObj *parent_ptr = NULL,
        const char *class_name = "AUCDFileReader");
    virtual void *ret_omx_ptr(const char *);
    OMXstr filename;
    OMXObj obj;
    OMXObj out;
};
```

由以上类的声明可以看到, 使用 AVS 的模块进行 VC++ 程序设计的特色。它只提供了数据文件的接口(filename)、导出对象(out)以及供 AViewer3D 显示的目标接口(obj)。编程时, 只需将数据文件名赋给 filename, 将 obj 赋给 AViewer3D 的输入接口, 我们就可以在 AViewer3D 的输出视口中获得文件中大量数据的可视化图像。我们无需编制具体的程序代码就可以实现高级的数据可视化效果, 这充分体现了面向对象编程的特点和优势。

4 软件系统框架及特色

弹粘塑性块体单元法分析与通常的有限单元法分析一样, 也需要进行前置处理、求解分析和后置处理。根据这三个模块, 在应用 VC++ 语言进行软件开发^[4]时, 制作了实现上述功能的 3 个类:

(1) 前置处理类 CPrevProc 确定块体分析的研究区域, 获得边坡工程中岩体结构面、接触面的产状参数; 最终通过块体系统识别程序(GenBlkd)^[5]进行块体单元的离散, 生成块体系统网格。

由于 AVS 强大的可视化功能更多的体现在处理已有数据方面(后处理), 而对于需要动态刷新数据的前处理来说, 自主编制程序代码能够更有效和更方便地实现这一目标。因此, 在 WBlock 的前处理中应用了 OpenGL 技术实现工程地质的计算机视图模拟, 而在后处理中才应用 AVS 实现分析数据的

可视化。

(2) 求解分析类 CStrsAnal 输入岩体结构面的力学参数、块体系统的荷载信息,调用应力分析预处理程序(GenStrsd)为应力稳定分析准备最终数据;最后指定计算条件,进行变形和应力稳定分析(Stress),得到块体形心位移、结构面应力等信息,最终可以得到任意块体组合的稳定安全系数。该类的声明如下:

```
class CStrsAnal : public CAnalysis {
public:
    CStrsAnal(){}; //默认构造函数
    CStrsAnal(const CString &datPath); //构造函数
    virtual ~CStrsAnal(); //析构函数
    void InitStData(); //初始化该类的成员变量
    void DelStContext(); //清除该类的对象中的成员赋值
    void ResetStContext(); //重置该类的对象中的成员赋值
    void StrsCtrl(); //输入控制信息
    void StrsMsg(); //输入物理信息
    BOOL SaveGstrsMSG(); //保存所有信息
    void BackupGenStrsdFiles(); //备份预处理数据文件
    void DeleteGenStrsdTempFiles(); //删除预处理临时文件
    BOOL GenStrsd(); //进行应力分析预处理
    void BackupStressFiles(); //备份应力分析数据文件
    void DeleteStressTempFiles(); //删除应力分析临时文件
    BOOL Stress(); //进行应力分析
private:
    BOOL m_bStini,m_bStin1;
    BOOL m_bHt1,m_bHt0;
    BOOL m_bPload,m_bVload,m_bHload;
    int m_vLoadMean;
    int m_nFail1,m_nFail0;
};
```

(3) 后置处理类 CStrsPost

用 AVS 的可视化模块将块体理论分析的数据成果用图形或图像宏观的显示出来,包括块体系统轴测图、块体位移矢量图、块体变形变位图、危险滑动块体或其组合的变位图、结构面应力分布云图等。通过这些图形直观的给出块体系统的稳定状况。

应用面向对象技术,采用特殊的单文档—双视图结构,将上述 3 个处理器封装到软件系统中。图 1 即为软件系统框架。

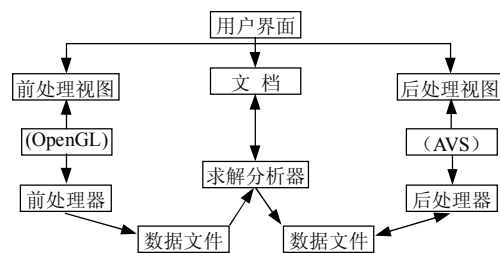


图 1 软件系统框架

Fig. 1 Framework of the software system

对于弹粘塑性块体元法,其在空间上的根本特点就是三维性。方便快捷的操作三维空间模型、显示三维矢量数据场,是本软件系统的基本特色。借助 OpenGL 和 AVS,用户可以很方便的从各个视角查看整个块体系统或者指定块体及其组合的变形变位状况,也可以查看任意结构面上的应力分布。通过对色彩的分析,可以直观的发现特征值的大小分布状况,找出位移最大的块体、应力最大的结构面部位等需要密切关注的信息,然后进行块体组合的变形和稳定性分析,即可得出相应块体组合的稳定安全系数,为工程加固提供依据。

4 算例

某深基坑边坡(图 2),在未开挖的天然条件下,由两条泥化夹层 D12、D21 和两条断层 F11、F13 切割。在南面垂直开挖约 20 m 深的基坑后,坡面上出现 4 个可能滑向开挖面的滑动块体。

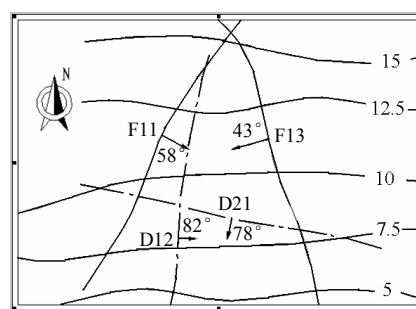


图 2 某边坡工程地质平面图

Fig. 2 Geological plane map of a slope engineering

运用 WBlock 对该边坡进行分析,其步骤如下:

(1) 工程建模 在整体坐标系下, X 轴方向水平向东, Y 轴方向水平向北, Z 轴方向朝上。确定研究区域上部为倾向南方的地形曲面,下部为水平边界平面;区域南侧为一垂直开挖面,东、西、

北三侧为垂直固定边界面。将泥化夹层及断层的空间几何形态简化为平面, 依次输入其产状参数, 建立地质模型。软件运行界面如图3。

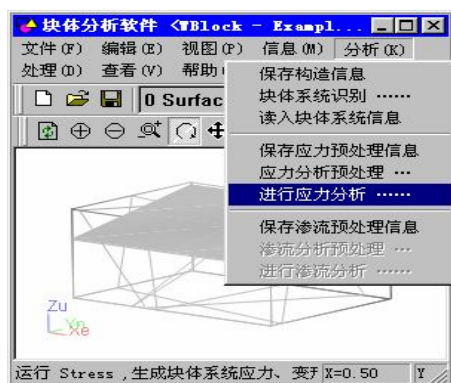


图3 软件运行界面

Fig. 3 Active interface of the software

(2) 块体系统识别 保存构造信息, 进行块体系统识别, 得到 55 个节点、15 个块体。如图4的系统轴测消隐图, 清晰的标示出可能失稳的块体单元。

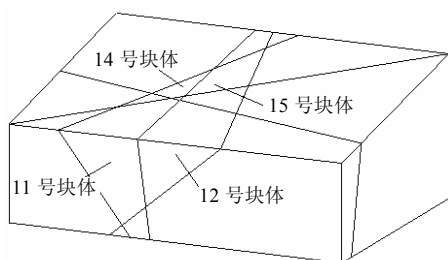


图4 块体系统轴测图

Fig. 4 Axonometric perspective of block system

(3) 应力应变分析 输入泥化夹层及断层的刚度系数及强度参数。经过数据预处理后, 首先降低所有结构面的强度, 进行迭代分析计算, 得到整个块体系统的位移、应力等信息。

(4) 数据处理 将块体整体变形的数据结果以图像形式在 AViewer3D 的输出视口中显示出来, 得到块体变形系统的色彩图。由此可以很直观地看到, 楔形岩体沿着由 F11 和 F13 切割而成的 V 形滑面向开挖面滑动。在彩色渲染图中, 数据值的大小按照红—绿—蓝的映射方式递减。根据色彩的分布或灰度, 可以直接找出位移最大的块体及其组合的部位, 并得到该组合中块体的编号(图4中的11-12-14-15)。将块体位移放大 500 倍, 对这个组合体进行局部显示, 即得到如图5的块体组合变形前后的系统图。

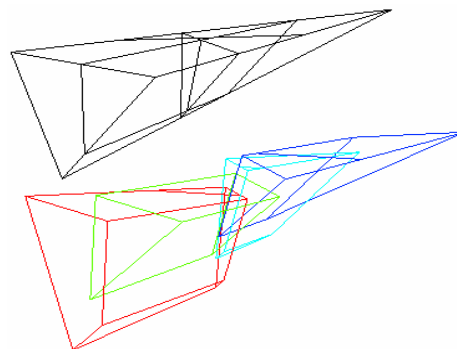


图5 块体组合变形前后系统图

Fig. 5 Block unions before and after deformation

图6显示了 F11 断层上的剪应力分布情况。值得注意的是, 由于弹粘塑性块体理论考虑了块体的转动位移, 导致结构面上应力的不均匀分布, 从图中可以很清晰的看出这一点。

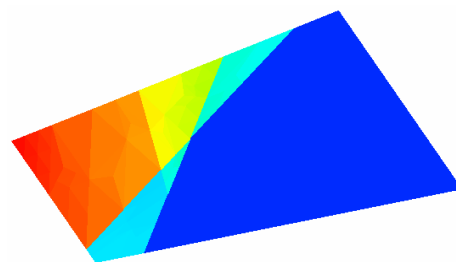


图6 F11 剪应力分布云图

Fig. 6 Shear stress distribution on F11

(5) 块体组合的安全系数 通过(4)找出位移最大的块体组合后, 只降低该组合的周边结构面的强度参数, 单独对此组合体进行迭代计算。当这些结构面的强度降低到一定值时, 迭代计算发散, 则强度的降低倍数即为该块体组合的安全系数。当然, 我们也可以预先搜索出危险滑动块体组合^[6], 再计算任意块体组合的安全系数, 从而得到安全系数低于设计要求的块体组合, 在实际边坡中找到该组合所在的部位, 采取相应的加固处理措施。

6 结语

弹粘塑性块体元法是一种新型有效的岩土工程中的数值分析方法, 具有广泛的应用前景。

因此, 有必要开发功能完备、实用高效、便于扩充的通用软件。笔者采用 VC++ 和 AVS/Express 可视化软件开发出块体元分析软件, 具有简捷实用、数据处理容量大、速度快、可视化功能强和软件编制组件化等优点。

参 考 文 献

- [1] 陈胜宏, 王鸿儒, 熊文林. 岩体三维弹粘塑性块体理论的初步研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(3): 55—61.
- [2] Chen S H, Shen B K, Huang M H, Stochastic elastic-viscoplastic analysis for discontinuous rock masses[J]. *Int. J. for Num. Meth. In Eng.*, 1994, 37(14): 2 429—2 444.
- [3] AVS Inc, Using AVS/Express[Z]. Waltham, MA, U.S.A : Advanced Visual Systems Inc, 1998.
- [4] 李于剑. Visual C++实践与提高—图形图像编程篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [5] 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.
- [6] 徐明毅, 汪卫明, 陈胜宏. 岩石边坡的危险滑动块体组合研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 148—151.