

面向对象三维有限元分析程序的研究和实现

陈卓^[1] 邓安福^[1]

段小雨^[2]

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市建设技术发展中心, 重庆 400015)

【摘要】 计算分析在岩土工程应用和研究中占有相当大的比重。传统的结构化编程方式需花费大量工时, 而且在可扩充性和代码可重用性方面也受到许多约束。因此, 将面向对象编程技术应用于有限元程序编制正成为岩土工程计算程序设计的主流。将面向对象有限元方法引入三维有限元程序, 用 C++ 语言编制了一个筏板基础与地基共同作用有限元分析程序, 作为对有限元新方法的一次有益尝试。

【关键词】 有限元软件; 面向对象技术; C++ 语言

【中图分类号】 TU 470.3

Research and Realization of Three-dimensional Object-oriented FEM Analysis Program

Chen Zhuo^[1] Deng Anfu^[1] Duan Xiaoyu^[2]

(1. Dept. of Civil Eng., Chongqing Univ., Chongqing 400045;

2. Construction Technology Developing-Center of Chongqing, Chongqing 400015 China)

【Abstract】 Calculation analysis has a important weight in engineering investigation and application. Process-Oriented-Programming (POP) has many disadvantages in readability, code use ratio, exploitation period, maintenance and so on. Therefore combination of the FEM and Object-Oriented programming (OOP) method has become a tendency in the filed of geotechnical engineering. The Object-Oriented programming of finite element software with language C++ is developed which solves three-dimensional interaction problems of raft foundation and soil. It is a useful attempt to study FEM by Object-Oriented method.

【Key Words】 FEM software; Object-Oriented technique; language C++

0 引言

有限元方法是工程中应用最广泛的数值方法之一, 其实现离不开计算机编程。现有的有限元分析工具, 大多是从 20 世纪 70 年代通过使用过程化设计发展起来的。虽然这些软件功能较完善、通用性较强, 但在程序的可维护性、可再用性、可扩充性上有一定的约束。直到面向对象有限元方法 (OOPEM) 的提出才克服了上述结构化设计的不足。它大大改善了有限元软件的性能, 提高了有限元软件的开发效率, 并为功能模块的集成化、扩充的灵活性提供了有利的条件。目前国内外对 OOFEM 的研究成果已较丰富, 其中几个主要基类的划分已趋于成熟, 但总的来说, 多数文献对其的讨论是集中在二维问题上, 少数文献^[1,2]涉及了三维问题的分析。作为面向对象有限元软件研究的继续, 本文用面向对象方法进行了三维有限元软件的开发, 通过 VC++ 编制了基于 Windows 平台, 分析地基基础共

同作用的软件实例。

1 面向对象编程的方法

面向对象编程方法的实质是对应用领域进行区分和组织, 重点在如何识别、理解和构造应用问题中的固有对象, 而不是让应用问题去适应计算机, 这是面向对象方法的基本思想和原则。其基本步骤包括分析、设计、实现。

分析是从问题陈述入手, 通过了解现状, 逐步建立一个分析模型的过程。这一模型应描述所面对的问题是什么, 要做的精确抽象是什么。

设计是指利用已经形式化的分析模型来定义子系统、软件体系结构的规范。同时进行对象和对象间通讯机制的描述, 进而构成完整的软件模型。

实现是在分析与设计基础上, 运用面向对象的编程语言、数据库及硬件设备进行代码开发工作, 完成系统的最终开发任务。

2 面向对象有限元程序的分析

面向对象程序分析过程在形式上为认定类和组织类之间关系的过程,而实质为数据抽象和代码重用。通常归结为三个步骤:识别对象类;识别对象类的属性和方法;识别对象类之间的关系。

2.1 识别对象类

有限元法的基础是结构的离散化,它的分析对象是离散后的单元。利用虚功方程建立的作用于单元上的节点力 P_r 和节点位移 δ_r 的关系式为:

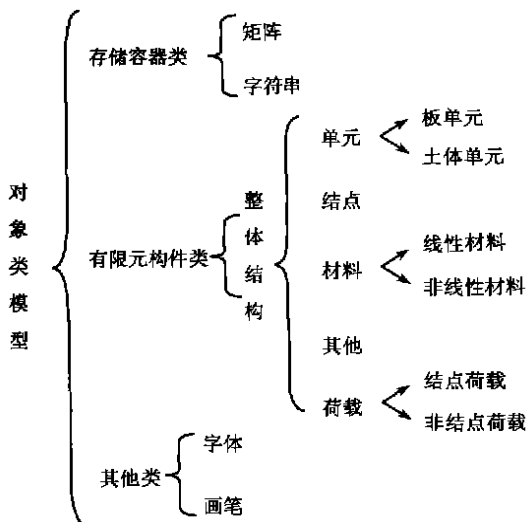
$$P_r = K_r \delta_r, \quad k_r = \int B^T D B dV$$

有限元的主要任务就是根据离散的单元数据得到等效的单元刚度矩阵 k_r 形成总刚度矩阵 K_r , 以及荷载列阵 P_r , 然后由整体平衡方程式求解出全结构的节点位移列阵 δ_r 。因此,在进行有限元法的对象设计时,将单元定义为一个基类,与单元相关的节点、载荷、材料等也定义为独立的基类。同时定义整体结构类对以上各个类的对象进行管理。

有限元程序中经常会遇到与矩阵相关的运算,因此,需定义矩阵类用于处理该问题。此外在程序中除了使用数字来显示数据外,还需要加入适当的图形,这样才更加易读易用,因此就需要加入画笔类,字体类等。

总的来说,目前在有限元设计中还没有统一模式的类模型。不同研究者根据经验和需要,识别出来的类是不一致的,但一般都会包含单元、结点、材料和荷载这些类,所以区别不大。参考文献[1],给出表1的对象类模型。

表1 对象类



2.2 识别对象类的属性和方法

各个对象类的属性和方法是根据有限元分析的

过程而确定。如获取结点坐标应该是由结点对象完成,计算单元刚度矩阵应该是由单元对象完成。因此,结点对象就需要有一个存储结点坐标的属性和一个获取结点坐标的方法,而单元对象就需要有一个存储单元结点刚度的属性以及计算该矩阵的方法。结点对象的属性和方法见表2。

表2 结点对象的属性和方法

结点对象类	
属性	方法
结点数	获取结点类型
结点类型数组	设置当前结点坐标
结点各向自由度序号数组	获取结点坐标
结点总自由度	获取结点总自由度
结点坐标数组	设置结点数
.....

2.3 识别对象类之间的关系

对象类之间主要有三种关系:继承关系、聚合关系、委托关系。

2.3.1 继承关系

该关系是面向对象分析中的基本概念。在分析过程中,根据类的共性和个性将类组织成不同的层次,高层次的类表达共性,为父类,低层次表达个性,为子类。子类通过继承获得父类全部或部分的属性和方法。表1中单元类与板单元类就是一种继承关系。

2.3.2 聚合关系

该关系是指一个对象由其他若干个对象组成,这些对象作为该对象的属性存在。表1中整体结构对象就是一个聚合对象,它包含了多种成分对象,如结点对象、单元对象、荷载对象以及材料对象,这些对象都是作为整体结构对象的属性存在。整体结构对象决定各个成分对象的创建顺序和通信方式,管理和协调成员对象之间的关系,控制和实现各种计算分析功能。

2.3.3 委托关系

这种关系是指两个对象本无任何关系,一个对象通过一定方式委托另一个对象执行部分工作,最后完成自己的工作。矩阵对象和单元对象之间就是这样一种关系。单元对象中很多属性变量都可以用矩阵来表示,如单元刚度矩阵、形函数矩阵、弹性矩阵等。这些属性变量的相加、相乘、转置、求逆、求行列式值的操作就需要单元对象委托矩阵对象来完成。

3 面向对象有限元程序的设计

在对象设计期间,将把分析阶段导出的对象模

型进行扩充。扩充的主要工作为:建立界面、任务管理和优化设计。

3.1 建立界面

面向对象的结构分析程序由程序语言实现后的完成品是封装起来的各个对象,可以采用以往的主程序调用子程序的方式,通过调用对象的功能操作完成计算分析过程。如文献[3]中所给出的实例化的例子,就显示了主程序调用子程序的过程。除此以外,也可将封装的对象嵌入其他程序,如编入具有窗口环境的 Windows 框架程序中,在 Windows 窗口环境下,用户通过界面向有限元分析程序发出消息来完成用户所需要的操作。窗口界面在分析过程中能随时将各种信息反馈给用户对象。这种人机交互的分析处理过程更符合面向对象的方法模式,因此有必要将传统有限元对象模型扩充到提供良好交互界面的对象模型体系中。

3.2 任务管理

在有限元对象类模型中,对象之间的关系是非常复杂的。如一个单元是由若干个结点组成,一个结点也可以出现在不同的单元;同样,每一单元还对应一个单元所使用的材料,而这种材料也可以出现在不同的单元。为了建立它们之间的关系,需要将单元、节点、材料等对象使用指针、指针数组管理起来。如在单元对象属性中添加指向结点对象的指针变量来获取单元结点坐标、结点各向约束信息;添加指向材料对象的指针数组,获取单元的材料参数等。

建立了各个对象的局部关系后,便是对有限元分析过程的组织。本文的思路见图 1。

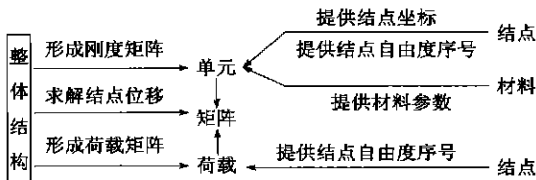


图 1 有限元的任务管理

3.3 优化设计

为提高计算效率,需要在设计上进行优化。如将单元对象属性中所包含的高斯积分点母坐标数组、应变矩阵、单元刚度矩阵、结点位移向量等开设为静态成员变量。开设这些变量,可以在成员函数反复调用时,免去这些数组变量的反复创建的赋初值过程,从而提高程序运行效率。由类 ABC 生成的三个对象,其中每个有其自身的拷贝 double hh, 而共享单一矩阵 SK(见图 2)。

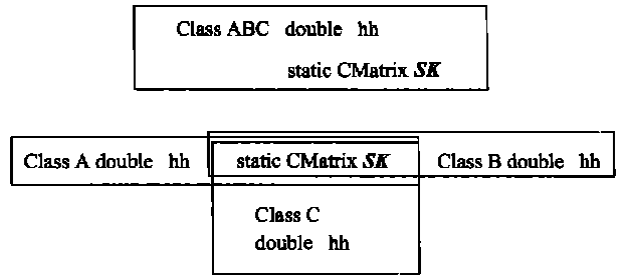


图 2 静态变量

4 面向对象有限元程序的实现

在分析和设计期间开发的对象类和它们之间的联系,最后进入具体的程序设计语言、数据库或硬件的实现阶段。

本文采用了 VC++ 6.0 编程平台,在这一平台上可以方便的设计窗口、绘制图形、显示位图等。从而简化了建立 Windows 界面的编程工作,使得开发者可以专注于研究面向对象有限元的部分。

根据前面确定的有限元分析过程的对象和所标识的对象间的关系,我们抽象出一个有限元分析类库。在此实现阶段,将对各个类的属性和方法进行具体的定义。以单元类为例,按单元应力的维数,可将单元类派生为杆单元、平面应力单元和块体单元。那么板单元应属于平面应力单元,土体单元应属于块体单元。下面就给出空间二十结点块体单元类的定义。

```

class CSolid20NodeEle:public CBaseElement {
protected:
int m_Node[20]; // 单元结点号
double StressX [27], StressY [27], StressZ [27],
StressXY [27], StressYZ [27], StressXZ [27]; // 高斯
点上的应力
double MainStress [27], MainStress1 [27], Main-
Stress2 [27]; // 高斯点上的主应力
double StrainX [27], StrainY [27], StrainZ [27],
StrainXY [27], static double xx [20], yy [20], zz [20];
// 结点母坐标
.....
public:
void GetInists(); // 求非线性弹性初始状态刚
度矩阵
void GetInists1(); // 求非线性弹性刚度矩阵
void GetNode(int *aiNode, int &nEleNode);
// 获取单元结点号和单元结点数
virtual void CalcuGKBandWidth(unsigned long *

```

```
aiGKDiagAdd); // 计算总刚度矩阵带宽
virtual void CalcuInternalForce (const double*
adNodeDisp); // 线弹性分析中的单元应变和应力
virtual void Initial(); // 单元应力应变初始化
virtual int GetType(); // 获取单元类型
virtual void Assemble(CSparseMatrix & GK);
// 将线弹性分析中单元刚度矩阵装入整体刚度矩阵
.....}
```

5 实例分析

地基上的筏板见图 3。板的弹性模量 $3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 泊松比 0.2, 板长 16 m, 宽 16 m, 板厚 0.9 m, 地基的弹性常数 $E=12.5 \text{ MPa}$, $\mu_s=0.3$, 作用在板上的竖向荷载: 角柱结点 $P_1=1\ 000 \text{ kN}$, 边柱结点 $P_2=2\ 000 \text{ kN}$, 中柱结点 $P_3=4\ 000 \text{ kN}$ 。为后叙方便, 将进行数据对比所用结点的编号见图 3。

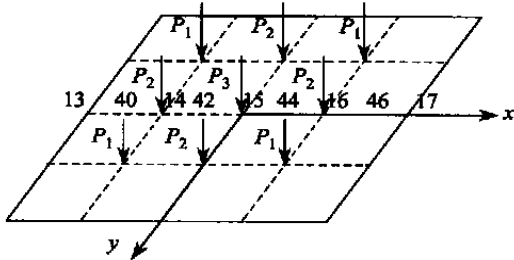


图 3 分析模型

MARC 前处理所生成的单元结点数据信息在本程序中显示见图 4。

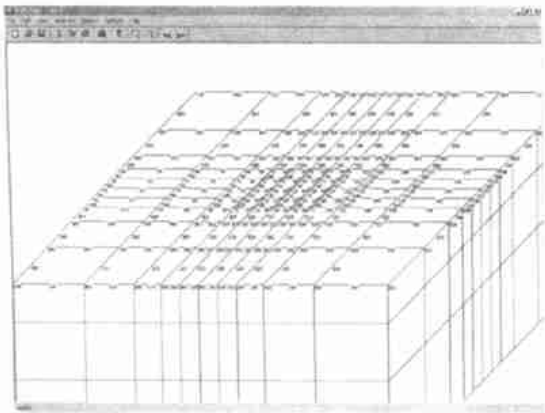


图 4 单元和结点

用本程序加载分析得到的单元竖向位移变形见图 5, 其中 X 轴上的结点位移值见表 3。

表 3 本程序计算结果

节点号	13	40	14	42	15
竖向位移	-0.049	-0.052	-0.057	-0.062	-0.065
节点号	44	16	46	17	
竖向位移	-0.062	-0.057	-0.052	-0.049	

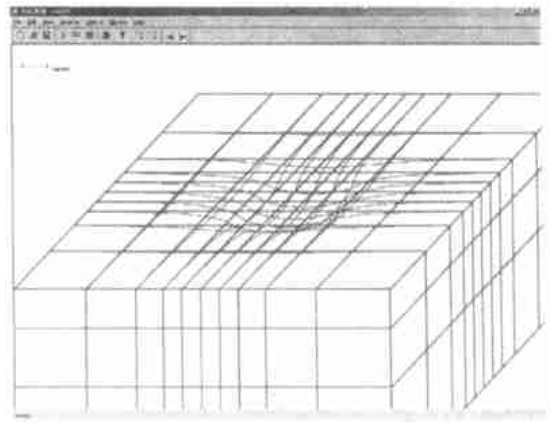


图 5 单元竖向位移变形

用 MARC 软件分析得出的 X 轴上结点竖向位移值见图 6, 具体数值见表 4。

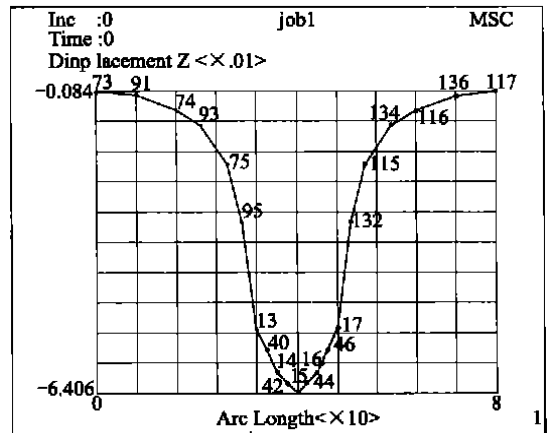


图 6 MARC 分析的竖向

表 4 MARC 计算结果

节点号	13	40	14	42	15
竖向位移	-0.050	-0.055	-0.059	-0.061	-0.064
节点号	44	16	46	17	
竖向位移	-0.061	-0.059	-0.055	-0.050	

对比表 3 和表 4, 我们可以看出本程序与 MARC 的分析结果基本上是一致的, 由图 5 可以看出通过后处理, 本程序可以将数据结果进行一定程度直观图形显示。这些不仅证明了面向对象方法进行三维有限元分析的可行性, 同时也体现了面向对象方法在该领域的优势。

6 结论

面向对象编程是程序设计思想上的一次革新, 它比结构化语言更能客观的反映事物之间的本质关系, 使编程人员可以集中精力放在类的设计上, 不用再为程序的通盘设计而煞费苦心。设计出来的程序更易于维护、更新和升级, 适合有限元程序的编制和不断发展的需要。
(下转第 95 页)

$$\text{式中: } E_n' = \frac{E_n(1-\nu_n)}{(1+\nu_n)(1-2\nu_n)}, \quad \nu_n' = \frac{\nu_n}{1-\nu_n},$$

$$G_n' = \frac{E_n}{2(1-\nu_n)}.$$

式(5)就是含有 n 组夹层的地基的本构方程的弹性矩阵的各个元素的计算表达式。

1.2 计算实例

有一夹层地基,其基岩为横观各向同性体,厚度 $h_0 = 5 \text{ m}$, 弹性常数为 $E_x = 30.7 \text{ MPa}$, $\nu_x = 0.5$, $E_y = 17.7 \text{ MPa}$, $\nu_y = 0.137$, $G_{xy} = 7.82 \text{ MPa}$ 。该地基含有三组夹层,一组夹层厚度为 $h_1 = 1.02 \text{ m}$, 弹性常数为 $E_1 = 18.3 \text{ MPa}$, $\nu_1 = 0.091$, 第二组夹层厚度 $h_2 = 0.95 \text{ m}$, 弹性常数为 $E_2 = 25.6 \text{ MPa}$, $\nu_2 = 0.24$, 第三组夹层厚度 $h_3 = 0.2 \text{ m}$, 弹性常数为 $E_3 = 22.7 \text{ MPa}$, $\nu_3 = 0.13$ 。求该夹层地基的弹性矩阵。

解:由横观各向同性地基的本构方程可得: $a_0 = 45.529 5$, $b_0 = 9.671 1$, $c_0 = 20.249 9$, $d_0 = 7.820 0$ 。

由公式(7)可得:

$$\begin{aligned} a_1 &= 36.517 7, & b_1 &= 0.437 3, & c_1 &= 19.976 0, \\ d_1 &= 7.929 3, & a_2 &= 35.237 6, & b_2 &= 0.042 7, \\ c_2 &= 20.940 6, & d_2 &= 8.188 0, & a_3 &= 34.898 7, \\ b_3 &= 0.005 5, & c_3 &= 21.007, & d_3 &= 8.230 4. \end{aligned}$$

所以该夹层地基的本构方程为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 34.898 7 & 0.005 5 & 0 \\ 0.005 5 & 21.007 & 0 \\ 0 & 0 & 8.230 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

由以上的计算过程可看出,夹层对地基的应变有很大的影响,在宏观上表现为由于夹层的存在,竖向位移也就增大。

2 结论

1)地基中所谓的夹层,一般为充填细粒的裂隙、层面、小断层、破碎带等硬度相对较软的材料,它们

不仅具有较低的弹性模量,较大的泊松比,而且其抗剪强度也低于正常的基岩。因此,对于地基中所含的各种夹层物理特性差异较大时,可将每一类物质当作一个夹层对待,等效成有 n 个夹层与基岩组成的夹层地基,利用本文的方法可算出该夹层地基的弹性矩阵。这里是把夹层对地基的影响平均化了。

2)地球上的岩土是经过漫长的地质年代形成的,由于沉积作用,许多岩土地基成层分布,对于这种地基,可分别测出各层岩土的力学参数,利用本文的方法可较简单的求出该种地基的弹性矩阵。

3)求出弹性矩阵后,可进一步反求等效横观各向同性地基的 5 个独立的弹性参数。

4)一般来说,地基土弹性模量随深度是递增的,对于这类地基可将其分成若干层,分别测定各层的力学参数,利用本文方法得出该地基的弹性矩阵。

参 考 文 献

- 1 潘家铮. 夹层地基上的建筑物的有限单元分析. 湖南水利电力科技. 1975(4):32~36
- 2 Zienkiewica O C. The finite element method in engineering science. Mc Graw Hill, 1971. 154~159
- 3 钱胜国. 软土夹层地基场地土层地震反应特性的研究. 工程抗震. 1994(1):82~90
- 4 戴尚纯. 八盘峡水电站软弱夹层地基的运行性状水力发电. 1994(10):32~40
- 5 Shifan Qiao, Baochen Liu, Zhilin Dun, et al. The Computation of Stress Caused by Horizontal Loads In a Transversely Isotropic Foundation [A]. Progress in Safety Science and Technology, vol. III. Beijing/New York: Science Press, 2002, 10.424~429
- 6 乔世范, 顿志林, 刘宝琛. 水平荷载作用下横观各向同性弹性地基中位移计算. 力学与实践. 2003(5):47~50

收稿日期:2003-12-22

(上接第 67 页)

参 考 文 献

- 1 余卫平, 肖明. 地下工程有限元图形系统的面向对象开发. 岩石与工程学报, 2002, 21(增):2049~2053
- 2 郑榕明等. 节理岩体三维块体系统面向对象的数据结构. 岩土力学, 2002, 23(1):
- 3 张向等. 面向对象的有限元程序设计, 计算力学学报, 1999, 16(2):
- 4 吴晓涵. 面向对象结构分析程序设计. 北京: 科学出版社, 2002. 4
- 5 曹骥, 袁勇. 面向对象有限元方法研究进展. 力学季刊, 2002, 23(1):
- 6 干腾君. 考虑上部结构共同作用的筏板基础分析及其优化: [学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2001

收稿日期:2003-12-29