

基于有限元的非杆件体系钢筋混凝土结构配筋计算方法研究

梁春雨

(工程设计院)

〔摘要〕 基于 Ansys 软件提供的二次开发平台,实现了非杆件体系三维有限元分析中空间应力重积分程序的研发,设计了任意截面形状和任意空间放置两种类型的算例对开发方法和程序进行了验证。最后总结了空间应力重积分技术开发的基本步骤和编程要点,为其它用户进行相关开发提供借鉴和参考。

〔关键词〕 Ansys 二次开发 应力积分

1 引言

水工建筑物多数为形体复杂或尺寸比例特殊结构(如蜗壳、尾水管、地下洞室、大体积混凝土孔口等),无法将结构简化为常规梁、板、柱基本构件,需要利用弹性应力进行结构强度设计。通用和专业结构分析有限元软件具有丰富的梁(杆)系模型结构内力输出功能,极大地提高了结构分析和设计工作效率;但是对形体复杂和空间整体性较强的特殊结构进行有限元分析,有时不得不采用空间实体单元,它较梁(杆)系模型能更准确地反映了结构的几何形式和实际受力状态。实体单元的使用,会衍生一个新的问题:空间应力重积分问题。当前,商用有限元软件均无法解决这一难题,因而结构应力分析在结构强度设计中的应用受到一定程度的限制。

本文研究成果成功解决了三个问题:①空间任意位置截面应力重积分②空间任意形状截面应力重积分③积分所用应力符合现行标准《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008)第12.2.1条^[1]“计算钢筋面积时,按主拉应力在配筋方向投影图形总面积”要求。本文为弹性力学问题向结构力学问题转换架起了一座桥梁,丰富大型软件的功能应用。

2 数值积分理论

通过三维有限元分析,得到结构体内任一点的空间应力场^[2-3],一点的应力状态可以由应力分量来表示:

$$\sigma = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

在已知以上六个分量的情况下,可以推求经过 P 点的任一斜面上的应力。为此,在 P 点附近取一个平面 ABC,平行于这一斜面,并与经过 P 点而平行于坐标面的三个平面形成一个微小的四面体 PABC,见图 1

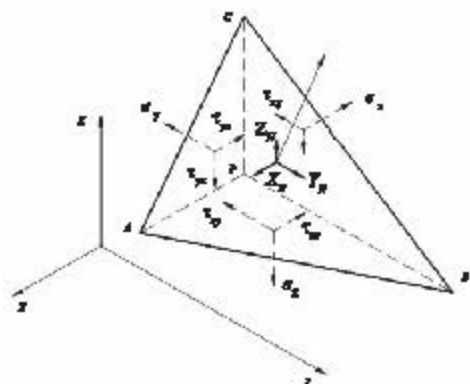


图1 空间点的应力状态

命平面 ABC 的外法线为 N , 其方向余弦为

$$\cos(N, x) = l, \cos(N, y) = m, \cos(N, z) = n$$

三角形 ABC 上的全应力 S_N 在坐标轴方向的分量用 X_N, Y_N, Z_N 代表, 根据力的平衡关系, 可得任一 Gauss 点 3 个坐标方向的应力分量为

$$\left. \begin{aligned} X_N &= l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{yz} \\ Y_N &= m\sigma_y + n\tau_{yz} + l\tau_{xy} \\ Z_N &= n\sigma_z + l\tau_{xz} + m\tau_{yz} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设三角形 ABC 上的正应力为 σ_N , 可由投影关系得

$$\sigma_N = lX_N + mY_N + nZ_N \quad (2)$$

根据剪应力互等定理, 将式(1)代入式(2)

$$\sigma_N = l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z + 2lm\tau_{xy} + 2nl\tau_{xz} + 2mn\tau_{yz} \quad (3)$$

三角形 ABC 上的全应力 s_N 而剪应力为 τ_N , 则由于

$$s_N^2 = \sigma_N^2 + \tau_N^2 = X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2 \quad (4)$$

因此, 切应力分量 τ_N 为

$$\tau_N^2 = X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2 - \sigma_N^2 \quad (5)$$

截面内力为

$$\begin{aligned} N &= \iint \sigma_N dA = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{Nij} A_{ij} \\ Q &= \iint \tau_N dA = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tau_{Nij} A_{ij} \\ M &= \iint \sigma_N l dA = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{Nij} l_{ij} A_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: l_{ij} 为积分点 (i, j) 到截面积分轴之距, A_{ij} 为积分点 (i, j) 控制面积, 其它符号如图 1 所示。

3 程序流程和编程概要

3.1 程序流程

在 Ansys 平台下, 进行应力重积分一般要分四步进行: 获取应力场结果、空间截面选取(空间三点坐标)、应力转换和应力积分, 程序流程图如图 2 所示。

3.2 编程概要

Ansys 的二次开发工具主要有四个, 即 APDL、UPFS、UIDL 及 Tcl/Tk。其中 APDL 作为 ANSYS 参数化设计语言, 具有参数定义、数值计算、流程控制、宏程序与子函数的使用、数据文件的输入输出等功能。能满足应力重积分相关计算。积分几何要素如图 3 所示, 程序设计时需要注意的几个方面。

(1) 积分截面: 空间平面用三点坐标来描述;

(2) 截面形心轴: 截面应力对其求矩, 获得最终的截面弯矩, 积分轴为积分平面内一条线, 知道方向即可, 位置可用程序根据形心定义自动搜索, 也可事先给出;

(3) 辅助积分轴: 与主积分轴平行, 位置在积分平面之外即可, 应力先对辅助积分轴积分, 然后利用移轴定理, 转换为对主积分轴的积分;

(4) 空间方向识别: 弯矩有顺逆时针, 剪力在平面内有正交两个方向, 轴力拉压区分;

(5) 应力重积分: 采用空间重积分技术, 对积分截面重新划网, 借助数值积分的概念, 对全截面进行积分, 对于复杂形状截面, 要考虑积分轴位置自动搜索的需要, 以及动态数组相关技术;

(6) 配筋计算: 经过前 5 步的计算, 将弹性力学各指标转变为结构力学指标, 可以得到截面的内力, 即弯矩、轴力和剪力。此时, 可以利用钢筋混凝土构件承载能力极限状态进行配筋计算。

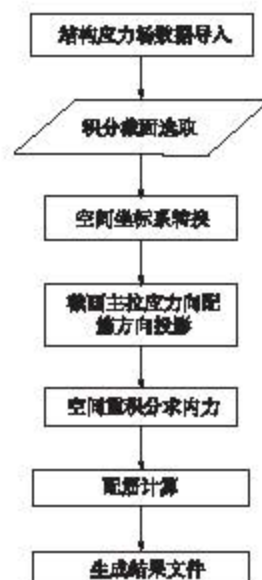


图2 空间应力重积分流程图

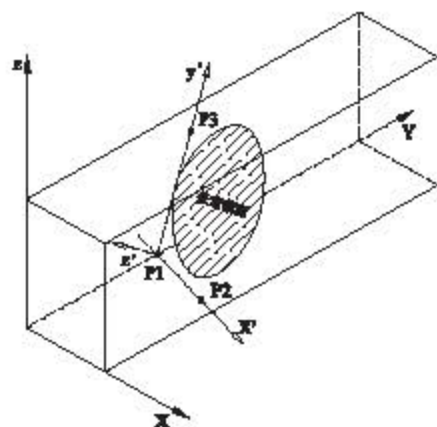


图3 积分几何信息图

4 算例验证

(1) 任意截面空间悬臂梁实体计算

悬臂梁梁长 $L = 10 \text{ m}$, 受均布荷载 $P = 10 \text{ kN/m}^2$, 梁截面有矩形、箱形、T形和工形四种型式见图 4 和图 5; 对梁固支端截面内力进行理论解与数值解求证, 计算结果见下表 1, 从表中可知, 各截面下内力

数值解和理论解相同。计算结果说明,无论多么复杂的截面形状,本程序均适用。

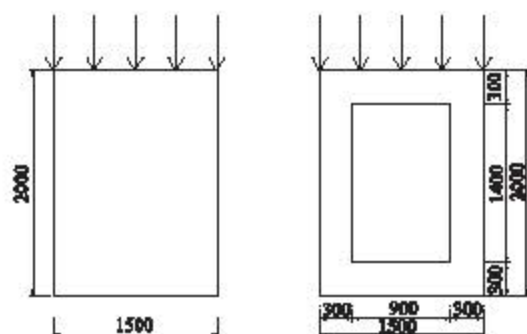


图4 矩形与箱形截面

(2)空间任意位置悬臂梁计算

为了验证本文积分方法空间适用性,设计了一截面平面于 π 平面悬臂梁。悬臂梁属性为:梁长 $L=10\text{ m}$,受均布荷载 $P=10\text{ kN/m}^2$,梁截面为矩形 $b=1.5\text{ m}$, $h=2\text{ m}$,梁的正截面法向量与 π 平面上法

向量平行,如图6所示;对梁固支端截面内力进行理论解与数值解求证,计算结果见下表2;弯矩误差在1.97%,剪力误差在0.88%。计算数据表明,各截面下内力数值解和理论解在排除数值计算误差的前提下,结果基本相同。计算成果表明,任意空间位置的截面,本程序均适用。解决了通用有限元程序中,只能对平行于笛卡尔坐标平面的截面求积分的问题。

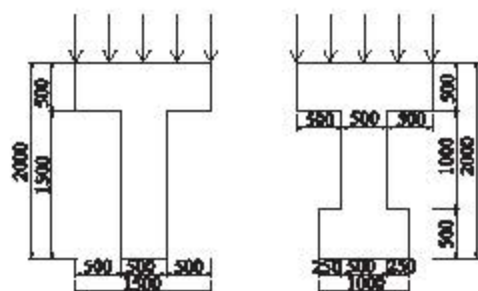


图5 T形与工形截面

表1 四种截面梁梁端内力理论值与计算值对比表

内力	理论解	矩形		箱形		T形		工形	
		计算值	误差%	计算值	误差%	计算值	误差%	计算值	误差%
$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	750	735.21	-1.97	735.53	-1.93	735.28	-1.96	735.24	-1.97
$N(\text{kN})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q(\text{kN})$	150	148.68	-0.88	149.08	-0.61	148.55	-0.01	148.51	-0.99

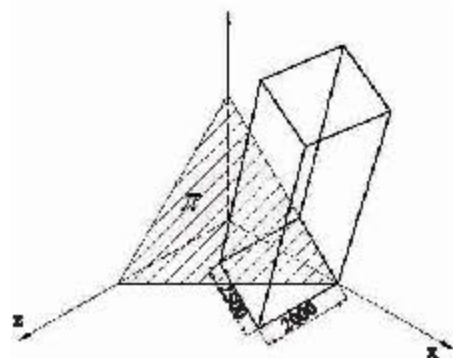


图6 截面置于空间 π 平面

表2 π 平面放置梁内力理论值与计算值对比表

内力	理论解	计算值	误差%
$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	750	735.21	-1.97
$N(\text{kN})$	0	0	0
$Q(\text{kN})$	150	148.68	-0.88

5 结论

根据 Ansys 提供的二次开发平台,利用弹性力学、空间几何、向量代数、理论力学基本原理方法,成功实现了非杆系体系空间应力重积分程序的开发。为了验证方法和程序的正确性,本文设计了具有解析解的悬臂梁模型进行数值模拟计算,结果表明,本

文的数值解与理论解十分吻合。

另外,本文研究成果能满足最新国家标准,拓展了有限元在水工结构复杂异形块体建筑物仿真分析中的应用,解决了工程技术人员数值分析中难题:有限元成果怎么与规范要求相衔接的问题。为水利工程建筑物设计优化,提供技术支撑,效益显著。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部.水工混凝土结构设计规范(SL191-2008)[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [2] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,1985.
- [3] 卓家寿.弹性力学中的有限单元法[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [4] 同济大学应用数学系.高等数学[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [5] 张文.水工钢筋混凝土构件设计步骤例题及程序[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [6] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [7] 王新敏. Ansys 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 祁庆和.水工建筑物[M].北京:水利电力出版社,1992.