

有限元内力分析的截面网格自动生成技术

姚纬明 颜天佑 李同春 赵兰浩 皮晓宇

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对进行复杂空间结构分析时需要分析其多个截面上的内力 ,而应用有限元内力法分析时人工准备截面信息难度大的情况 ,通过对有限元网格进行分析 ,利用网格的空间几何关系 ,提出了由计算机自动生成求解有限元内力所需截面信息的方法。结合有限元内力法求得截面上结点的约束内力 ,进而求得截面上的结构内力(轴力、剪力、弯矩)。通过对各截面交线的处理 ,将结构内力值以工程需要的形式在截面上表示出来 ,方便了工程技术人员参考使用。

关键词 :结构内力计算 ;指定截面 ;自动生成技术 ;有限元法

中图分类号 :TV31 ;O241.82 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)06-0040-03

Technology of mesh auto-generation in cross-section for internal force analysis with FEM//YAO Wei-ming , YAN Tian-you , LI Tong-chun , ZHAO Lan-hao , PI Xiao-yu(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : It is necessary to investigate the internal forces in multiple cross-sections for analysis of complicated spatial structure ; however , it is difficult to obtain the information of cross-sections in internal force analysis with FEM . Based on the analysis of the geometric relationship of finite element meshes , a method of auto-generation of information about cross-sections by computers , which is necessary for solving the internal forces with FEM , is proposed . With this method , the internal constraining forces at nodes of the given sections are obtained , and then , the structural internal forces of the given sections , including the axial force , shear force and bending moment , can also be obtained . By dealing with the intersecting lines of the sections , the structural internal forces are expressed in specified forms in the cross-sections which are suitable for engineering projects and convenient for technical personnel .

Key words : structural internal force calculation ; specified cross-section ; auto-generation technology ; FEM

在设计规范^[1] ,钢筋混凝土结构构件承载力极限状态计算是根据截面的结构内力进行的。对于一个多层的复杂空间结构 ,用常规的结构力学分析方法难以得出各组合部件的内力 ,合理的方法是用三维有限元法求解。傅作新^[2]针对拱坝应力集中问题提出了有限元等效应力法。针对该方法存在的缺点 ,李同春等^[3]提出了直接由有限元得到的位移和单元刚度矩阵求解截面内力的有限元内力法。

由现有的有限元分析软件 ,输入不在同一条直线上的 3 个点 ,在屏幕上可以显示出这 3 点所确定的切面 ,但该切面有可能是穿过某个体单元的 ,不符合有限元内力法的要求。应用有限元内力法分析时 ,关键是要确定指定截面上结点所属单元的单元信息 ,且此截面是由各个体单元的表面组成的连续的切面 ,由这些单元信息通过内力法就可以求出截面上各个结点的约束内力值 ,进而求得截面上的结构内力值。对于比较复杂的结构来说 ,三维有限元

网格比较复杂 ,而且内力分析需要多个截面 ,用人工处理工作量非常大 ,为此本文提出了由计算机生成求解有限元内力所需截面信息的方法。

1 指定截面的自动生成

三维有限元网格是由一系列空间单元构成的 ,每个空间单元的结点编号都是按照一定顺序编排的 ,体可以拆成面 ,面可以拆成线 ,线可以拆成点。一种面单元的标记方法是按单元进行 ,每个单元面的编号顺序规定为绕该面的外法向正向转动 ,如图 1 中体单元中的两个面单元 (1 4 3 2)和(2 3 7 6)。

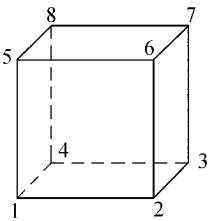


图 1 标准六面体单元的结点编号顺序

首先确定所求截面的控制方程,从所求截面中选出任意不在同一条直线上的3个结点(这3个结点的绕向顺序必须是沿着坐标轴正向的)求得指定截面的控制方程为 $Ax + By + Cz + D = 0$,输入距离控制量 Δ_d , Δ_d 一般取为指定截面上的面单元在体单元中的最小高度。以六面体单元为例,将1个六面体单元拆成6个面单元,对面单元上的4个结点进行判断,结点坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,判断公式如式(1)式(2)。

当所求截面的外法线方向为正时:

$$-\Delta_d < \frac{Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \leq 0 \quad (1)$$

当所求截面的外法线方向为负时:

$$0 \leq \frac{Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} < \Delta_d \quad (2)$$

对符合上述条件的面单元还要进行进一步筛选:

- a. 对截面上面单元的隶属性质进行判断,截面中的面单元必定属于2个体单元,去除属于1个体单元的面(临空面)。
- b. 对截面所属体单元的形心点 (x_c, y_c, z_c) 进行判断,当截面的外法线方向为正时 $Ax_c + By_c + Cz_c + D < 0$,当截面的外法线方向为负时 $Ax_c + By_c + Cz_c + D > 0$,这样可以去除可能出现的重面(当面单元属于控制截面时,面单元会被纪录2次)。
- c. 对截面上面单元上的结点进行循环,如果4条线两两重合,则为退化单元,需删除,但要另外记录这些退化单元。

d. 当截得的面具有一定的折角(如图2中 $\angle 129$),且 Δ_d 值比较小时,有可能将整个体单元都包括进去。列出不属于截面上的结点(可由有限元分析软件直接找到,如图2中5,6,7,8号结点),如果某个面单元中包含任一列出的结点,则这个面单元就不予考虑,以得到连续的切面。

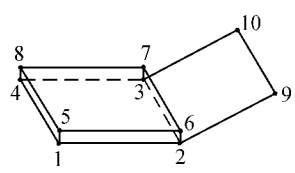


图2 截面折角示意图

如果有其他特殊情况,可以增添控制条件,再进行筛选,最终得到所要求的截面,并求得截面上的约束内力值。

2 由截面约束内力求解结构内力

通过有限元内力法可以求得截面上各个结点上的约束内力,因此需对截面约束内力进行进一步合成。现以矩形截面为例说明合成方法。

如图3,设由点 j, k, m, n 围成的截面包含结点1,2,3,线段13和32为面 $jkmn$ 的中线,线段12的中点为 O ,已解出每个结点在整体坐标系下的约束内力为: $f_c^i = f_{cx}^i, f_{cy}^i, f_{cz}^i$,则该截面上相对于点1,2,3在局部坐标系下的等效结构内力为

$$N_\xi = \sum_{i=1}^n f_c^i R_f \quad (3)$$

$$Q_\eta = \sum_{i=1}^n f_c^i R_l \quad (4)$$

$$M_\xi = \sum_{i=1}^n (f_c^i R_f) k_{io} d_{io}^i \quad (5)$$

式中: n 为线段上包含的结点总数; f_c^i 为每个结点在整体坐标系下的约束内力值; R_f 为截面的法向量; R_l 为线段12的方向向量; d_{io}^i 为线段上各点到中点的距离; k_{io} 为线段上各点到中点指向变量(与线段方向同向时 $k_{io} = 1$,反向时 $k_{io} = -1$)。

再将上述结构内力值除以面 $jkmn$ 的宽度 jk ,就可得到截面中单位宽度上的结构内力值。

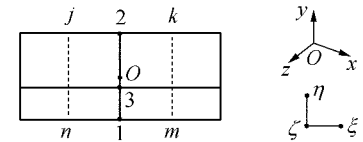


图3 结构内力计算简图

工程中采用的内力表示方法如下:图4中所示的线段12为②号面上的一条截线,它代表了一个垂直于②号面的单位宽度面,由截线12上的内力值就可以求出②号面内截线12处的正应力 σ 的分布情况。此时,截线12上的内力值即为另一个所属面(①号面)中线段12按照本节所述方法求得的结构内力值。所以实现这一方法的关键是要判断各条截线的隶属情况,即要找到各个切面的相交线段。

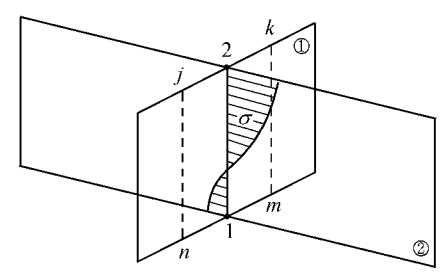


图4 结构内力表示方法示意图

3 截面交线的自动形成

截面上的四结点面单元拆成两结点线单元,对线单元中的结点进行循环,判断线单元出现的次数。如果只出现1次,则该线段为截面上的边界线(组成截面边界上的线段),其余的线段为截面内部线段(如图3中的线段12和13),交线段属于截面的内部线段。

- a. 判断各个面的交线段。取出一个面中的内

部线段与其他面中的内部线段进行比较,如果出现相同的线段(也是一个线单元),则认为该线段就是这两个面的交线段。

b. 合并一个面中的线单元。观察一个截面中的交线段,有很多线段是既相交而又在一条直线上的,则就要将这些线段单元合并成为一个线单元,具体方法如图5所示。图中 R_1, R_2, R_3 为结点的整体编号。在情况①中, i 号线单元中2号点(或1号点)和 j 号线单元中的1号点(或2号点)整体编号相同,并且2条直线的方向相同或者相反,则将这2个线单元合并成1个线单元,释放 j 号线单元,保留 i 号线单元,相同点合并编为 i 号线单元的中间点(3号点),形式如情况②中的 i 号线单元。

依照同样的方法将具有中间点的2个线单元合并,如情况③所示。

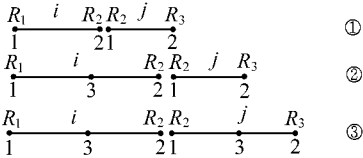


图5 线段单元合并示意图

c. 调整线单元的方向。为使交线段和图3中的线段方向一致,需要对所得交线段的方向(1号点到2号点的方向)进行判断,如果线单元的单位方向向量中的绝对值最大的分量为负值,则将线单元中2个结点的局部编号进行交换,使得每个线单元的方向都为正值。由这些交线段,根据内力法原理和结构内力合成方法,就可求得交接面上的结构内力值。

4 算 例

某泵站为多层复杂的空间结构,其横剖面如图6所示。泵站采用堤身式布置,站身为整体块基型结构,坐落在基岩上。泵站模型单元总数为1647(八结点六面体等参单元数为15573,梁杆单元数为904),结点总数为22726。模型考虑块基结构与地基的相互作用,取高程8.8~32.2m的整体混凝土结构和一定范围的地基(沿水流方向站下、站上各延伸

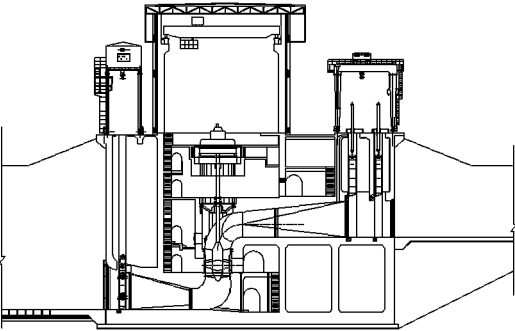


图6 泵站横剖面示意图

25m,地基地部高程为-21.2m,地基表面高程为8.8m,垂直水流方向左岸延伸20.9m,右岸延伸30.3m)作为一个整体结构。此泵站有限元分析共有7个计算工况(完建、正常运行、设计洪水、校核洪水、最高扬程、底板检修、事故停机),荷载考虑风荷载、土压力、水压力及自重的相互作用。

根据实际需要,泵站站身一共切了62个截面,如图7所示,通过有限元内力法计算出各个截面上的结构内力。单个切面形式如图8所示,经过单元简化变成框架形式,并将结构内力值表示在框架简化图上^[4]。

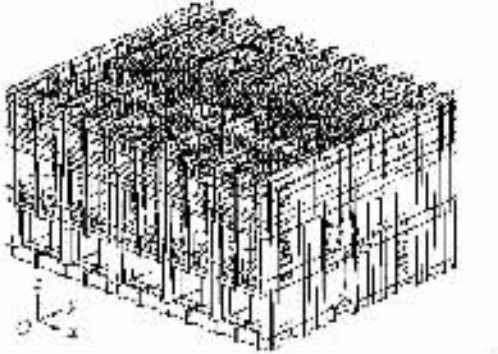


图7 泵站站身结构截面示意图

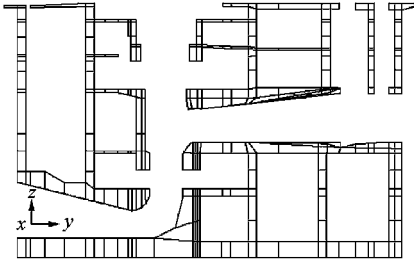


图8 站身某纵剖面切面分布示意图

5 结 语

通过对三维有限元网格指定截面的自动生成方法的研究,利用网格的空间几何关系,提出了由计算机自动生成内力法所需截面信息的方法,扩展了有限元内力法在其他复杂工程中的应用。由有限元内力法求得截面上结构的内力,并且以比较准确、直观的形式标示在截面示意图上,方便了工程技术人员参考使用。

参考文献:

[1] SL/T191—96 水工混凝土结构设计规范[S].
[2] 傅作新.水工结构力学问题的分析与计算[M].南京:河海大学出版社,1993:28-43.
[3] 李同春,温召旺.拱坝应力分析中的有限元内力法[J].水力发电学报,2000(4):1-3.
[4] 颜天佑.大型泵站结构三维有限元内力分析研究[D].南京:河海大学,2006.

(收稿日期 2005-06-29 编辑:高建群)