

水工渗流有限元网格剖分的控制断面节点对连法

岑 建 ,詹美礼

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :提出水工渗流有限元网格剖分的控制断面节点对连法 ,通过布置适当的控制断面 ,利用 VBA 对 AutoCAD 进行二次开发 ,生成控制断面的二维网格信息 ,将相邻控制断面相应节点对连并通过插值实现三维网格的自动剖分。该法较好地解决了由计算对象边界复杂、材料分区多变带来的有限元三维网格自动剖分的困难。算例表明 ,该法运用简单、适应性强、效率高。

关键词 :渗流 ;有限元法 ;网格剖分 ;VBA

中图分类号 :TV223.7

文献标识码 :B

文章编号 :1006-764X(2006)05-0048-03

Method for node joining in control section for mesh auto-generation in seepage FEM analysis//CEN Jian ,ZHAN Mei-li
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : By layout of proper control sections , 2D meshes for control section are generated by secondary development of AutoCAD with VBA. Three-dimensional meshes are auto-generated by joining the corresponding nodes in adjoining control sections , and the interpolation method is employed to make 3D meshes denser. The method overcomes the difficulty induced by complicated boundary and changeable materials of calculated objectives in auto-generation of the 3D FEM meshes. Two engineering applications show that the method is of high applicability and efficiency and is convenient in operation.

Key words : seepage ; FEM ; mesh generation ; VBA

随着计算机技术和数值计算技术的发展 ,很多领域的有限元计算成为可能 ,随之带来的一个问题是有限元网格的生成。众所周知 ,用有限元解决工程问题时 ,其精度在很大程度上取决于网格离散的好坏 ,如何快速地建立精确的有限元网格在有限元分析中十分重要。在三维有限元网格划分中 ,由于八节点六面体单元具有求解精度高的特点 ,所以该单元是三维网格划分的首选单元。目前出现了许多较为成功的有限元前、后处理的商业软件 ,如 ANSYS ,SAP 等^[1-2] ,它们能够较方便地对形状规则、结构组成规律性强、材料分布均匀的计算对象(如混凝土坝体、机械零件等)进行网格自动剖分 ,但由于存在对结构发生变化处网格调整不便以及网格剖分疏密程度难以控制等缺点 ,使它们对于结构多变、材料分区复杂的对象难以进行自动剖分。同时 ,国内外也进行了许多有限元网格自动生成技术的研究 ,实现六面体有限元网格划分的算法主要有以下几种 :①超单元网格划分法^[3] ;②采用波前法逐层由实体表面向实体内部生成六面体网格^[4] ;③基于网格填充法的六面体网格划分^[5]等。实践表明 ,这些方法同样无法较容易地对结构多变、材料分区复杂的

对象自动剖分。

水工渗流有限元分析通常具有以下特点 :①计算区域较大 ;②地形、地质情况复杂。如地层厚薄不均 ,存在许多断层和挤压带等。而这些地质特性对渗流影响很大。③建筑物结构复杂 ,不易连接。如计算区域同时存在坝体及地下厂房 ,防渗帷幕多变(帷幕排数、深度多变) ,存在众多排水孔幕等。这就使得上述的自动剖分更加困难。针对这种情况 ,笔者提出了适应于复杂地质情况 ,且建筑物结构复杂的有限元网格自动剖分的控制断面节点对连法。

1 控制断面节点对连法

控制断面节点对连法不同于以往的三维有限元网格自动剖分法——追求网格全自动生成的算法 ,而是从计算对象的基本特点出发 ,充分利用现有的地形、地质资料以及建筑物剖面资料 ,布置能够控制计算对象几何外形、边界条件和空间变化的控制断面 ,对控制断面作二维网格划分 ,并利用 VBA 对 AutoCAD 进行二次开发 ,通过鼠标点击获得二维网格的单元信息 ,在此基础上通过二维网格的单元节点坐标信息作三维坐标转换 ,并让相邻的控制断面

相应节点对连,按一定的连接方式,即可生成三维网格。再根据不同需要(如不同防渗、排水布置方案,关键计算区域网格的加密),可方便地调整和加密网格。该网格自动剖分法的主要步骤是:①布置和绘制控制断面;②生成控制断面的二维网格及相应信息;③按一定的连接方式生成三维网格,并对单元网格进行加密剖分。

1.1 布置并绘制控制断面

对于水工渗流分析,根据可供参考的地形图、枢纽平面布置图、地质剖面图和建筑物纵横剖面图,可以了解计算区域地形、地层的变化情况以及建筑物在平面和深度方向的位置,并以此正确地布置控制断面。控制断面的布置应遵循下述原则:①沿某个特定方向(如垂直坝轴线方向)布置控制断面;②能控制地形及主要地层的空间变化;③能准确控制建筑物的空间位置;④控制剖面尽量平行布置,以确保剖分后单元形态良好;⑤数量尽可能少。控制断面可以是直线面、曲面或折面。

控制断面确定后,根据图文资料可绘制出断面上的地形、地层线以及建筑物轮廓。

1.1.1 地形及地层线的绘制

为了精确地绘制各断面的地形及地层线,利用 VBA 中的 Getpoint 函数对 AutoCAD 二次开发,用鼠标捕捉地形图上的等高线,将地形图转换为三维数据文件^[6],运用 Surfer 软件将数据文件转换为“.grd”格式,再建立控制断面平面控制点坐标的“.int”格式文件,运用 Surfer 中的“slice”命令去切取“.grd”文件即可生成控制断面的地形线数据。利用 Surfer 绘图即可得到控制断面的地形线。用同样的方法可得到各地层线。通过“.dxf”文件转换将 Surfer 图导入 AutoCAD。

1.1.2 建筑物的绘制

根据枢纽平面布置图和各建筑物的纵、横剖面图,可以确定各建筑物在控制断面上的位置和形状,这样就很容易在布置的控制断面图上绘制出各种建筑物。

1.2 二维网格及相应的信息生成

利用控制断面上地形、地层线及建筑物的轮廓线,根据充分显示地形、地层变化和建筑物轮廓的原则,可将控制断面作二维四边形(局部可为三角形)网格划分。由于控制断面节点对连法是基于相邻断面对应节点对连形成三维网格,为了使断面上的任一节点能够在相邻断面上找到唯一节点与之对应,控制断面上的二维网格划分应遵循一定的规则,即无论控制断面差异有多大,都用同一规格划分二维网格,同一规格是指任一控制断面的网格划分所用的横线和竖线数量均相等。

1.2.1 布置控制断面上的横竖线

将控制断面编号为 P_k ($k = 1, 2, \dots, l$),横线编号为 i ($i = 1, 2, \dots, n$),竖线编号为 j ($j = 1, 2, \dots, m$)。控制断面上的横、竖线布置应满足以下条件:①尽可能反映本断面上地形、地层变化及建筑物轮廓;②兼顾总体,使任一断面上的横、竖线数均相等,使得在 P_{k-1} 断面上必须找到唯一的 (i, j) 节点与 P_k 断面上的 (i, j) 节点对应;③横、竖线能与相邻剖面很好地连接,使得剖面间材料光滑、连续且剖分后单元形态良好。控制断面及其上的横、竖线布置合理与否是三维网格剖分好坏的关键。

1.2.2 获取二维网格的节点坐标信息

节点坐标信息的获取是通过利用 VBA 中的 Getpoint 函数对 AutoCAD 进行二次开发,只需在 AutoCAD 空间的二维网格图上用鼠标捕捉节点就能自动生成二维节点坐标信息^[6]。由于在对各个控制断面作二维网格划分时,会根据地层和建筑物变化情况(如地层的不连续等)将部分横、竖线部分或全部地合并或拆分(如图 1 所示),所以在节点重合处必须重复点击该节点以获得节点坐标信息。

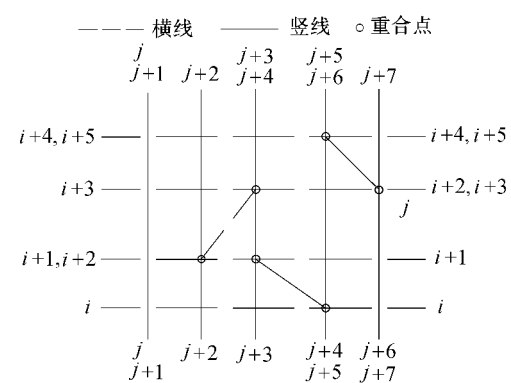


图 1 横竖网格线合并和拆分示意图

1.2.3 二维网格材料信息的生成

材料信息的生成是通过在每一条横线上给出一个总材料号来实现,该材料号代表该横线与上面一条横线之间的网格材料。对于其中不是该材料的个别网格,通过 3 个信息符 N_x (横线号)、 N_y (竖线号)、 N_z (新材料号)来控制,将该网格的材料号用新材料号替换。这样,二维网格及相应的信息就全部生成。

1.3 三维网格的形成及剖分

根据二维网格的节点坐标信息,将其作三维转换,再根据相邻控制断面节点对连,就形成初次三维网格。通过给出每个初次六面体单元 3 个方向上的剖分信息,可将初次三维网格进行自动剖分,生成满足计算需要的三维网格。

1.3.1 初次三维网格的形成

根据得到的控制断面上的二维四边形网格节点

坐标信息 利用控制断面的控制点平面坐标,通过坐标的三维转换及直线段上的线性(或非线性)内插值,可将二维节点坐标信息转换为三维节点坐标信息。通过控制断面上相应节点的对连就形成了初次三维网格。对于重复节点应经过判断消除,以确保节点号唯一。对体积 $V=0$ 的单元,经过判断也应将这些无意义单元剔除。再将网格重新编号,通过一定的排序方式使每个初次六面体单元得到节点信息。初次六面体单元的材料信息与构成该单元的前一个控制剖面(或后一个控制剖面)上的材料信息一致。

1.3.2 初次三维网格的剖分

将得到的初次三维网格的3个方向给出相应的剖分参数,利用线性(或非线性)插值,即可将初次三维网格作进一步剖分。3个方向给出的相应的剖分参数通过控制剖面间、剖面上的横线间和竖线间的剖分数统一给出。通过对剖分后的单元作 Jacobian 行列式检查^[7]及在 AutoCAD 中单独画出每一种材料的网格图,对生成的单元检查,对材料信息错误和单元形态不好的网格进行修正。最后对网格质量进行优化处理,对单元网格节点进行优化排序^[8],生成最终的计算网格图。

2 算 例

在糯扎渡水电站高心墙堆石坝枢纽渗控优化分析研究中,计算区域为 $1.3 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$,地质结构极其复杂,计算区域内有4种主要地层,地层埋深和厚度的变化很大,且区域内存在12条宽度和长度不等的断层,这些断层与计算区域内的建筑物存在不同程度的斜交。枢纽坝型为黏土心墙坝,在坝的左岸设有地下厂房和泄洪道。整个枢纽的防渗帷幕布置和地下厂房排水孔幕布置很复杂。这些都给有限元三维网格剖分带来了很大困难。利用本文提出的控制断面节点对连法,通过选择适当的控制剖面,可较快地建立有限元三维网格。枢纽整体三维网格见图2,断层三维网格见图3。实践表明,用该方法实现的有限元三维网格剖分能很好地反映复杂的地形、地质和建筑物情况,且操作简单,效率较高。

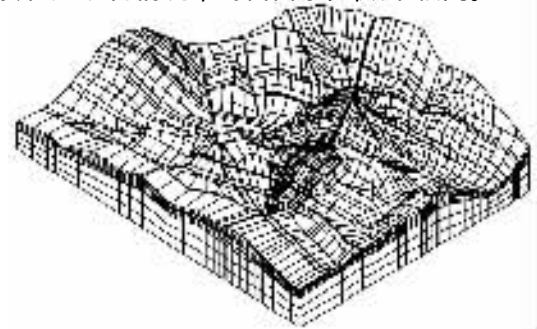


图2 枢纽整体三维网格



图3 断层三维网格

3 结 语

本文方法较好地结合了三维水工渗流有限元分析中计算区域大、地层和建筑物变化复杂、材料分区多变的特点,具有较强的适用性。实践表明该法具有以下优点:①对地层和建筑物变化复杂、材料分区多变的计算对象的适应性较强;②通过 VBA 对 AutoCAD 二次开发,通过鼠标点击就可以获得节点坐标信息,应用简单、效率高且不易出错;③剖分的算法相对较简单,程序容易实现。

参考文献:

- [1] 张朝晖. ANSYS 8.0 结构分析及实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2002: 32-40.
- [2] 朱以文, 韦庆如, 顾伯达. 微机有限元前后处理系统 ViziCAD 及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1993: 268-278.
- [3] 陈和群, 彭宣茂. 有限元微机程序和图形处理[M]. 南京:河海大学出版社, 1992: 171-189.
- [4] BLACHER T D, MEYERS R J. Seams and wedges in plastering: a 3-D hexahedral mesh generation algorithm[J]. Engineering with Computers, 1993, 9(2): 83-93.
- [5] SCHNEIDERS R. A grid-based algorithm for the generation of hexahedral element meshes[J]. Engineering with Computers, 1996, 12(3/4): 168-177.
- [6] 严飞, 詹美礼, 速宝玉. AutoCAD 中 VBA 语言在渗流有限元前处理中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 28-29.
- [7] 左旭, 卫原平, 陈军, 等. 基于 Jacobian 矩阵的三维有限元网格质量优化[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(5): 142-144.
- [8] 刑渊, 董林峰. 有限元网格节点优化排序方法研究[J]. 计算力学学报, 1999, 16(3): 366-369.
- [9] 盛金昌, 赵坚, 速宝玉, 等. 复杂地质条件下超大型洞室群有限元网格的自动生成[J]. 水力发电学报, 2000(4): 79-85.

(收稿日期 2005-06-24 编辑 高建群)