

水工结构有限元分析的前处理

⑬
5-2-54,66 冀春楼 杨小平

祖波 侯百军

TV3/

(黄河水利委员会水利科学研究院 郑州 450003) (黑龙江省水利厅 哈尔滨 150001)

摘要 利用超单元概念自动生成有限元网格,建立了五面体和四面体超单元网格生成模式,并编制了超单元自动生成网格法的有限元前处理程序。

关键词 水工结构 有限元法 超单元 五面体 四面体

利用有限元法进行结构的数值分析时工作量很大,如何提高有限元分析效率是普遍关注的问题,而有限元前处理是问题的焦点之一。本文利用超单元概念^[1],编制比较先进的三维块体结构自动剖分程序,程序中超单元类型有六面体实体超单元、五面体实体超单元、四面体实体超单元、六面体无体积接触面超单元、五面体无体积接触面超单元、六面体无体积连接止水超单元。主要工作是建立了五面体和四面体超单元网格生成模式。

1 超单元网格生成

1.1 六面体超单元网格生成

对某个空间八结点实体超单元,将其变换到正六面体母单元中,依剖分要求求出母单元的网格点局部坐标,由坐标变换解出网格结点的整体坐标,并相应地定义结点和单元编号以及单元信息^[1]。对于八结点六面体无体积接触面和连接止水超单元的网格生成,其剖分与实体单元一致,只是沿夹层厚度方向不再进行剖分。

1.2 五面体超单元网格生成

单元剖分中,五面体超单元经常用到,对三角形面采用各边的结点数相等且等分,以等腰直角三棱柱作为母单元,剖分生成的单

元有八结点六面体单元和六结点五面体单元。

1.2.1 网格结点的局部坐标和整体坐标

图 1 所示为五面体母单元和三角形面的网格生成,假定母单元 ξ, η, ζ 三方向生成的结点数分别为 m, n, l , 其中 $m = n$, 三角形各边结点数相等且等分, ζ 方向可不等分, 剖分比例因子 λ_ζ , 考虑程序编制的结构性, 在 ξ, η 两方向仍采用剖分比例因子, 只是 $\lambda_\xi = \lambda_\eta = 1$ 。结点局部坐标表示为

$$\begin{cases} \xi_{ijk} = (\sum_{j=1}^i \lambda_\xi^{j-1} - 1) / (\sum_{j=1}^m \lambda_\xi^{j-1} - 1) \\ \eta_{ijk} = (\sum_{j=1}^i \lambda_\eta^{j-1} - 1) / (\sum_{j=1}^n \lambda_\eta^{j-1} - 1) \\ \zeta_{ijk} = 2(\sum_{j=1}^k \lambda_\zeta^{j-1} - 1) / (\sum_{j=1}^l \lambda_\zeta^{j-1} - 1) - 1 \end{cases} \quad (1)$$

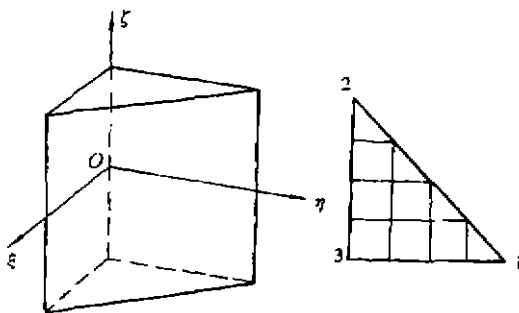


图 1 五面体母单元及三角形面的网格生成

第一作者简介:冀春楼,男,博士,从事水工结构研究,曾发表《水闸抗振的一种实用分析方法》等论文。

结点整体坐标表达式为

$$\begin{cases} x_{ijk} = \sum_{a=1}^6 N_a x_a \\ y_{ijk} = \sum_{a=1}^6 N_a y_a \\ z_{ijk} = \sum_{a=1}^6 N_a z_a \end{cases} \quad (2)$$

其中, N_a 为坐标变换形函数:

$$\begin{aligned} N_1 &= (1 - \xi)\xi/2 \\ N_2 &= (1 - \xi)\eta/2 \\ N_3 &= (1 - \xi)(1 - \xi - \eta)/2 \\ N_4 &= (1 + \xi)\xi/2 \\ N_5 &= (1 + \xi)\eta/2 \\ N_6 &= (1 + \xi)(1 - \xi - \eta)/2 \end{aligned}$$

1.2.2 空间网格结点、单元编号及单元信息

结点编号顺序为 $\xi = 0$ 至 $\xi = 1$; 再从 $\eta = 0$ 至 $\eta = 1$; 最后 $\zeta = -1$ 至 $\zeta = 1$, 表达式为

$$N_{ijk} = \frac{(m+1)n}{2}(k-1) + \frac{(2m+2-j)}{2}(j-1) + i \quad (3)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m+1-j$ 。单元编号顺序和结点编号顺序一致, 表达式为

$$M_{ijk} = \frac{m(n-1)}{2}(k-1) + \frac{(2m-j)}{2}(j-1) + i \quad (4)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, l-1; j = 1, 2, \dots, n-1; i = 1, 2, \dots, m-j$ 。

与单元编号相应单元信息依据单元所在位置, 有六面体八结点单元和五面体六结点单元。

当 $i+j \neq m$ 时为六面体八结点单元:

$$E_{ijk} = (N_{i(j+1)k}, N_{ijk}, N_{(i+1)(j+1)k}, N_{(i+1)jk}, N_{i(j+1)(k+1)}, N_{ij(k+1)}, N_{(i+1)(j+1)(k+1)}, N_{(i+1)j(k+1)}) \quad (5)$$

当 $i+j = m$ 时为五面体六结点单元:

$$E_{ijk} = (N_{(i+1)jk}, N_{i(j+1)k}, N_{ijk}, N_{(i+1)j(k+1)}, N_{i(j+1)(k+1)}, N_{ij(k+1)}) \quad (6)$$

对于五面体无体积接触面超单元, 其剖

分与实体五面体超单元一致, 只是沿夹层厚度方向不再进行剖分。

1.3 四面体超单元网格生成

四面体超单元剖分时, 各边结点数相等且为等分, 母单元为等直角边的直角三棱锥, 剖分生成的单元有八结点六面体单元、六结点五面体单元以及四结点四面体单元, 图 2 所示为其母单元及网格生成。

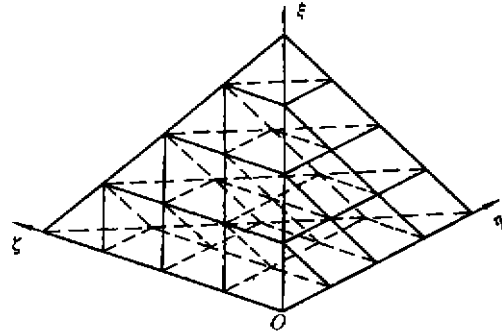


图 2 四面体母单元及网格生成

1.3.1 网格结点的局部坐标和整体坐标

假定母单元在 ξ, η, ζ 三个方向生成的结点数分别为 m, n, l , 且 $m = n = l$, 考虑程序编制的结构性, 三个方向仍采用剖分比例因子 $\lambda_\xi, \lambda_\eta, \lambda_\zeta$, 比例因子数值均为 1。结点局部坐标表示为

$$\begin{cases} \xi_{ijk} = (\sum_{s=1}^i \lambda_\xi^{s-1} - 1) / (\sum_{s=1}^m \lambda_\xi^{s-1} - 1) \\ \eta_{ijk} = (\sum_{s=1}^j \lambda_\eta^{s-1} - 1) / (\sum_{s=1}^n \lambda_\eta^{s-1} - 1) \\ \zeta_{ijk} = (\sum_{s=1}^k \lambda_\zeta^{s-1} - 1) / (\sum_{s=1}^l \lambda_\zeta^{s-1} - 1) \end{cases} \quad (7)$$

结点整体坐标表达式为

$$\begin{cases} x_{ijk} = \sum_{a=1}^4 N_a x_a \\ y_{ijk} = \sum_{a=1}^4 N_a y_a \\ z_{ijk} = \sum_{a=1}^4 N_a z_a \end{cases} \quad (8)$$

式中 N_a 为坐标变换形函数, $N_1 = \eta, N_2 = \zeta, N_3 = 1 - \xi - \eta - \zeta, N_4 = \xi$ 。

1.3.2 空间网格结点、单元编号及单元信息

结点编号顺序: 从 $\zeta = 0$ 至 $\zeta = 1$; 再从 η

$=0$ 至 $\eta=1$; 最后 $\xi=0$ 至 $\xi=1$, 表示为

$$N_{ijk} = \sum_{s=2}^i \frac{(m+3-s)(m+2-s)}{2} + \frac{2(m+1-i)+2-j}{2}(j-1) + k \quad (9)$$

式中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m+1-i; k=1, 2, \dots, m+2-i-j$ 。

单元编号与结点编号顺序一致, 表达式为

$$M_{ijk} = \sum_{s=2}^i \frac{(m+2-s)(m+1-s)}{2} + \frac{2(m-i)+2-j}{2}(j-1) + k \quad (10)$$

式中 $i=1, 2, \dots, m-1; j=1, 2, \dots, m-i; k=1, 2, \dots, m+1-i-j$ 。

式(9)和式(10)中带“ Σ ”的算式部分, 在 $i=1$ 时, 其数值为零。与单元编号相应的单元信息依据单元处在超单元中位置确定单元类型, 有八结点六面体单元、六结点五面体单元和四结点四面体单元。

当 $k=1$ 且 $j+k \neq m+1-i$ 时, 为六结点五面体单元:

$$E_{ijk} = (N_{i(j+1)k}, N_{(i+1)(j+1)k}, N_{i(j+1)(k+1)}, N_{ijk}, N_{(i+1)jk}, N_{ij(k+1)}) \quad (11)$$

当 $k=1$ 且 $j+k = m+1-i$ 时, 为四结点四面体单元:

$$E_{ijk} = (N_{i(j+1)k}, N_{ij(k+1)}, N_{ijk}, N_{(i+1)jk}) \quad (12)$$

当 $k \neq 1$ 且 $j+k \neq m+1-i$ 时, 为六结点五面体单元:

$$E_{ijk} = (N_{ij(k+1)}, N_{ijk}, N_{i(j+1)(k+1)}, N_{i(j+1)k}, N_{(i+1)jk}, N_{(i+1)j(k-1)}, N_{(i+1)(j+1)k}, N_{(i+1)(j+1)(k-1)}) \quad (13)$$

当 $k \neq 1$ 且 $j+k = m+1-i$ 时, 为八结点六面体单元:

$$N_{ijk} = (N_{i(j+1)k}, N_{ij(k+1)}, N_{ijk}, N_{(i+1)(j+1)(k-1)}, N_{(i+1)jk}, N_{(i+1)j(k-1)}) \quad (14)$$

2 重复结点的消除

有限元网格的自动剖分是逐个对超单元

进行的, 剖分中在超单元间的公共边界面或公共边界线和公共边界点上会出现重复编号的结点。采用结点坐标比较的办法消除重复的结点编号, 对超单元边界面上的结点逐个与已生成的结点进行坐标比较实现重复结点的消除。对于无体积的接触面和连接止水超单元, 采用设置很小的 Δt 厚度办法以免与消除重复结点的方法相矛盾, 在剖分结束后再消除设置的 Δt 厚度。

3 剖分实例

对 100 m 高的面板堆石坝进行了有限元网格离散, 坝顶宽 10 m, 上、下边坡均为 1:1.4, 河床底宽 100 m, 两岸边坡 1:2.0。面板厚 0.5 m, 趾板厚 2.0 m, 趾板宽取 4 m; 坝基部分范围, 从坝底向下取 100 m, 两岸分别向外取 100 m, 向上游取 150 m, 向下游取 200 m。超单元总数为 61 个, 自动剖分生成单元总数为 15115, 结点总数为 16480, 见图 3。

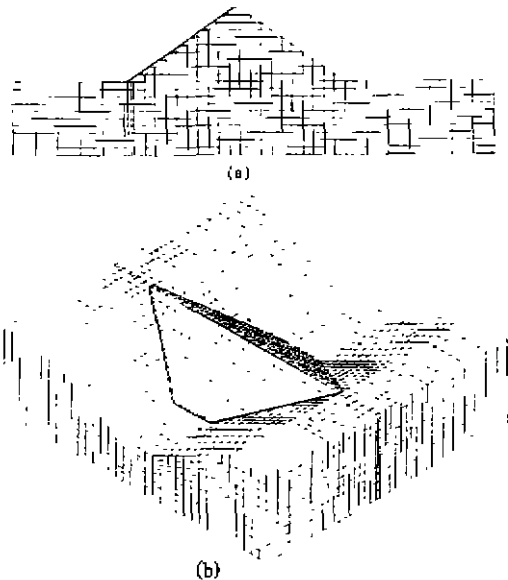


图 3 剖分实例

(a)剖面网格; (b)三维网格

从剖分实例可以看出, 该有限元网格离散方法可剖分比较复杂的结构, 手工离散超单元工作量小, 大部分工作由计算机完成。

(下转第 66 页)

香山科学会议简介

香山科学会议于1992年由国家科委发起,在国家科委和中国科学院的支持下于1993年正式创办。香山科学会议还得到国防科工委、国家自然科学基金委和中国科学院学部的经费支持。

香山科学会议以北京著名风景区香山命名,是以学术讨论会为主的并有多样形式的学术活动的长期性会议。它为科学家提供学术自由交流、讨论的宽松环境,弘扬学术自由讨论精神,以评述报告、专题发言和深入讨论的方式,探讨科学前沿和科学未来的跨学科、综合性、整体性、高知识层次性、研究性质的会议。

香山科学会议由中国科学前沿和科学未来研究与交流中心(简称香山科学会议中心)主办,聘请卢嘉锡、周光召、朱光亚、朱丽兰、惠永正、张存浩、陈能宽、唐有祺、许智宏、吴文俊、严东生、涂光炽、邹承鲁、师昌绪为科学顾问。

香山科学会议的宗旨是:创造学术自由讨论的宽松环境,弘扬学术自由讨论的精神,促进学科交叉与融合,推进整体性研究,面向科学前沿,面向科学未来,促进创新。促进创新的体现是:激励科学新思想,促进年轻科学家的成长,弘扬科学精神。

香山科学会议希望通过自己的活动:①弘扬学术自由讨论精神,弘扬科学精神;②促进学科间的相互作用,交叉与融合;③推动跨学科的综合研究,促进整体性认识;④激励对科学未来的关注和兴趣,吸引科学家把注意力和兴趣投向最有希望、最重要的科学前沿问题,特别是学科交叉的前沿问题;⑤促进不同学科领域,不同工作背景的学者与专家之间的结识、学习、交流和合作;⑥促进年轻科学家的成长,使他们置身于跨学科的高知识层次的学术讨论中增加知识,拓宽视野并得到锻炼。

香山科学会议的主题是“科学前沿和未来”,探讨的基本内容是:①交流和讨论、评论科学的最新进展,特别关注突破性进展;②分析和确定关键的科学问题和解决的理论基础和方法、途径;③探索新方向、新生长点和蕴育的新苗头;④展望与预测科学的发展趋势,敏察科学发展的机遇;⑤探讨和发展新方法、新途径与发展高新技术的应用。另外,研讨有关科技政策、管理和科技战略方面的问题,提出咨询意见。

香山科学会议遵循的原则是:贯彻百家争鸣的方针,提倡求是和创新的科学态度,弘扬学术上的平等、自由思考、自由讨论和争论的精神。鼓励畅所欲言,

提倡大胆发表意见,欢迎对自己观点的不同看法。不追求学术观点的共识。鼓励对原有学说、理论的大胆的理性的质疑和富有创造性的想象力。鼓励和保护创新思想。

香山科学会议的多样性体现为:①学术讨论会;②专题学术报告会;③双周科学论坛;④编辑与出版《科学前沿与未来》系列专著。

任何科学家和技术专家都可按香山科学会议的宗旨提出举办会议的申请或建议,以及提出参加会议的申请。会议申请一旦同意,即发出筹备会议的通知。参加会议的申请,以会前一个月收到会议邀请书为准。香山科学会议办公室备有会议申请表和参加会议的申请表,可索取填写。

目前,每年举办20~24个学术讨论会(至1997年8月共举办了79次)。按会议主题性质,可分以下几种会议类型:①最新进展的交流和讨论;②“现状与未来”的探讨;③前两者的组合类型;④科学及高新技术发展特点和趋势,以及科学战略、科技政策、科技管理和弘扬科学精神的讨论。每次讨论会议都有若干中心议题(部分讨论会为系列讨论会,隔一年或隔两年举办一次,其中心议题根据研究进展有所不同),会期3天半,每次会议人数35~40人(不包括国际会议)。

联系:100864,北京三里河52号,中国科学院科技政策局,香山科学会议办公室。

(翟立群 刘 庆供稿)

(上接第54页)

4 结 语

a. 文中提出的五面体和四面体超单元网格生成模式,是超单元网格生成法功能上的补充,使得该方法使用更加方便、灵活,并可离散各种复杂块体结构。

b. 超单元生成法尚有进一步开发的潜力,利用已有的六面体、五面体和四面体超单元,组成新的组合型超单元并相应地建立其剖分模式,可使超单元网格生成法适用性更强、效率更高。

参考文献

- 1 陈和群,彭宣茂.有限元微程序和图形处理.南京:河海大学出版社,1992.
- 2 华东水利学院编.弹性力学问题的有限单元法.北京:水利出版社,1977.

(收稿日期:1997-04-10 编辑:张志琴)