

MD 程序介绍

何传永 杨萍

(水利水电科学研究院计算中心)

提 要

本文介绍了作者编制的 MD 程序, 此程序适用于多种坝型有限元分析的前处理。

一、引 言

有限元分析在水电工程中得到广泛的应用。但有限元分析的数据准备工作量相当大, 特别是体型复杂的三维有限元分析, 其数据准备工作不仅耗工耗时, 而且易出错误。因此开发前处理系统, 由计算机代替人工做大部分的输入数据准备工作, 提高有限元软件的应用效率是十分必要的。

近年来, 通用的有限元分析前处理系统——有限元模型, 对坝工分析仍不太方便和灵活。ADAP也含有前处理功能, 但仅能作拱坝分析的前处理。为此编制了 MD 程序, 它适用于拱坝、土石坝、重力坝等多种坝型的有限元前处理, 可供设计单位应用。

二、有限元网络的自动生成

1. 坝体单元的生成

一旦给定了网格高程、坝体几何信息和控制参数, 本方法就确定了相应的网格生成模式, 计算出控制网格生成的指示矩阵以及节点总数和单元总数。图 1 表示水平方向和竖直方向单元网格布置图。对于 U 形河谷, 可任意指定剖分谷底垂直线的条数。选择坝中横剖面为标准横剖面, 将标准横剖面分成子块进行单元剖分, 生成节点信息和单元信息, 然后分别向左右两岸各剖面逐层递推。在递推过程中, 去掉递推层剖面坝体—岩基连接线以下相应于标准横剖面的节点, 根据指示矩阵自动进行单元退化, 形成三维有限元网格。

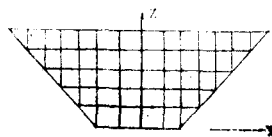


图 1 U形河谷单元
网格生成

图 2 表示一个三心圆拱坝水平截面。设通过拱顶上游边的竖直曲面为坝体参考曲面 (图 2 中虚线所示)。整体坐标 O—X—Y—Z 的原点为参考曲面、拱冠截面和岩基面的交界点。X 轴指向下游, Y 轴顺坝轴方向, Z 轴垂直向上。

图 3 为一个典型的重力坝横剖面。将其分成前 (1°)、中 (2°) 和后 (3°) 三块, 各块相对独立, 其高度根据设计要求取任意高程值。当 1° 块和 3° 块的高度与 2° 块高度相等时, 组合成土石坝形状; 当 1° 块和 3° 块的高度为零时, 2° 块变成单曲或双曲拱坝横剖面。

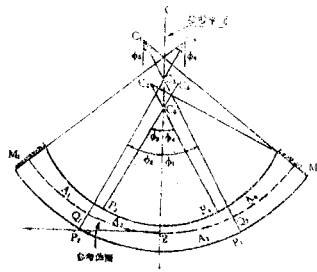


图2 三心圆拱坝的水平截面

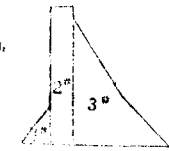


图3

在坝体横剖面上,上、下游表面节点的连线,形成单元网格的水平线。以水平线与上、下游节点的交点为始端,分别向下作垂线至基岩,形成1°块和3°块单元网格的垂直线。

2°单元网格垂直线条数可根据不同的精度要求任意给定。对只有2°块的单曲或双曲拱坝,坝体内部节点坐标为该高程上游节点和下游节点坐标之差对节点个数求平均值。图4表示重力坝标准横剖面网格布置图。

程序中设三个参数在图4中,除了2°块网格垂直线条数可以由参数NM2任意选取外,1°块和3°块在顺河流方向网格密度也可以分别由参数NM1、NM3控制。NM1和NM3分别为正整数,据精度要求选取。当指定NM3为一正整数N时,3°块每隔N条垂线,保留一条垂线,中间各条垂线抹掉。例如在图4中,当NM3等于1时,抹掉图中3°块中的虚线。

在大坝有限元分析中,常常对某些部位的应力状态特别关注。通过增加网格高程数和2°块垂直线条数实现局部网格加密。若突出坝踵和坝趾的应力状态,可在坝的下部多加几个网格高程。由网格高程和NM1、NM2和NM3等参数,就可以灵活地控制坝体各部位网格的疏密,使自动生成的坝体有限元网格比较合理,满足精度要求。



图4 重力坝横剖面

2. 地基单元的生成

坝基岩体由于受构造影响,断层、节理、裂隙纵横切割,形成不均一的各向异性工程地质单元。目前还缺少处理复杂多变的各种地质情况的办法。本程序采用一种固定的单元网格生成模式来生成基岩网格,必要时可根据实际地质情况作数据修改。

取一坝体横剖面与岩基交界线,以上、下游两点坐标的中点为圆心,以坝高为半径作一半圆。用坝体一岩基交界线的节点数加1等分半圆(如图5中虚线所示)。除岩基自由面两点外,半圆上各点与坝体一岩基交界点依次相连,向外延伸使长度等于半圆半径,坝基上、下游两个节点分别和半圆的两个端点相连,向外延伸,也使长度等于半圆半径。各延伸线端点连线,就是地基网格的范围,如图5中实线所示。也可据实际工程需要,给定基岩剖面的圆心和半径。假定地基网格以外的岩体都是刚性的。

地基单元网格的划分,是在各条延伸线上,取0.2倍半圆半径的线段,连接各点,形成第一层单元,各延伸线中点连线形成第二层和第三层单元。

如果认为地基是刚性的,不考虑其位移影响,则坝体一岩基交界线上的节点受三个方向的约束。

图6表示右岸坝基在Y—Z平面上的投影。点A₁

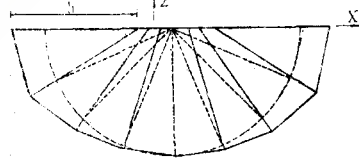


图5 基础网格的选取范围

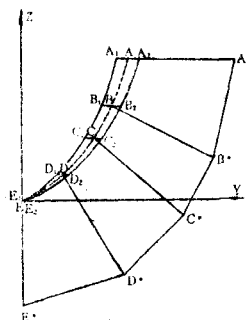


图6 地基节点在Y—Z平面投影

和 A_2 、 B_1 和 B_2 ……分别是上、下游坝面与岩基交接处的节点， A 、 B ……为它们的中心点。作各中点的法线 BB^* 、 CC^* 、 DD^* ，坝顶中点 A 作水平线 AA^* 。通过这些法线（坝顶为水平线）作与 Y 轴平行的倾斜平面，将岩基分割成若干层，与坝体各横剖面相连。由于坝体各横剖面的坝体—岩基交界线上的节点个数不等，所作的延伸线条数不等，因而地基各层网格也就疏密不等。在整体坐标 Y 方向存在单元退化问题。地基单元网格不是用标准横剖面递推的方法生成，而是逐层生成，这是与坝体单元网格生成方式不同之处。

坝体可以采用 8 节点单元或 20 节点单元，地基只采用 8 节点单元，无论坝体采用哪种单元。地基网格的划分都是一样的，坝体—岩基交界线上的 20 节点单元的边中点对地基不作延伸线，只是其相连的地基单元节点数大于 8。

如果生成的地基网格不能满足工程要求，可输入附加数据来修改部分节点坐标、物理参数，使地基网格更符合工程的实际地质情况。

3. 单元退化和节点编号

本程序具有单元自动退化的特点，可满足边界条件。图 1 中与两岸地基相连的坝体单元和图 4 中的上、下游表面单元（属于 1*块或 3*块）都是标准单元的退化形式。由网格生成模式形成指示矩阵标明各个单元所处的位置，决定该单元是否退化和退化方向。

在有限元分析中，节点和单元必须按逻辑顺序编号。在使用计算机自动生成有限元网格的同时，按一定规律给单元和节点自动编号。

节点编号的规律是：先径向（ X 方向），从上游坝面到下游坝面的各节点；后竖向（ Z 方向），自坝顶到坝底，再到基岩倾斜平面上的全部节点；最后自左岸到右岸（ Y 方向）。

单元编号的规律与节点编号的规律相同。

4. 坝内廊道的处理

在坝体内常布置各种廊道，计算时，必须考虑廊道的影响。坝体可以先按实心坝生成有限元网格，然后指出廊道所占单元号，自动抹掉廊道占用单元重新进行单元编号。通过调整节点坐标，使单元吻合廊道形状。

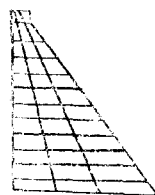


图 7

三、工程实例

水电部西北勘测设计院在李家峡水电站初步设计中，用 ADAP 程序分别作了直线重力坝、重力拱坝有限元分析。直线重力坝坝高 156 m，底宽 129 m，给定 13 个网格高程。生成的谷底横剖面单元网格如图 7、8 所示，采用 8 节点固体单元，沿水流方向分三层。由图可见，坝底附近单元较稀疏，单元形态也不十分理想。用本程序重作该题目，取 8 个网格高程，生成 294 个 20 等参坝体单元和 354 个 8 节点

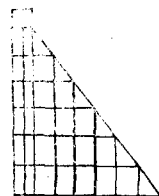


图 8

（下转 78 页）

$173^{\circ}52'29''$ $155^{\circ}54'28''$
 循环输入 $B(I) = 65.14$ 80.82
 110.49 58.70
 108.63 144.19
 输入 $XA=1000$ $YA=800$
 输出结果 $XA=1000$ $Y(3) = 746.19$
 $YA=800$ $X(4) = 817.28$
 $X(1) = 942.49$ $Y(4) = 720.62$
 $Y(1) = 830.58$ $X(5) = 875.62$
 $X(2) = 838.43$ $Y(5) = 727.06$
 $Y(2) = 793.43$ $X(6) = 1000$
 $X(3) = 740.61$ $Y(6) = 800$

表1 闭合导线坐标计算表

点号	观测角 (内角)	边长 (米)	纵坐标	
			X	Y
A	$58^{\circ}23'25''$	65.14	1000.00	800.00
1	$132^{\circ}21'02''$	110.49	942.49	830.58
2	$173^{\circ}52'29''$	108.63	838.43	793.43
3	$44^{\circ}13'20''$		740.61	746.19
4	$155^{\circ}15'16''$	80.82	817.28	720.62
5	$155^{\circ}54'28''$	58.70	875.62	727.06
6		144.19	1000.00	800.00

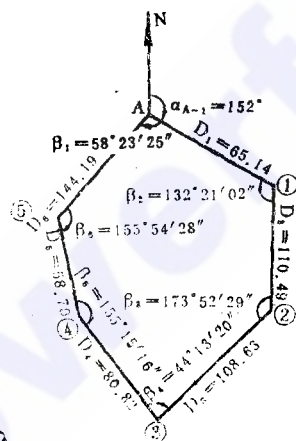


图1

6. 说明

(1) 源程序中 65 句和 100 句, 主要是检查所输入
的角和边的位置是否正确。

(2) 角和坐标增量的调整原则是: 角大调整得多, 角小调整得少; 坐标增量则
调整多, 坐标增量小则调整少。

(上接75页)

地基单元。输入数据为 13 个记录, 分别为标题卡, 主控卡, 网格生成控制卡以及各网格
高程几何数据卡。坝体横剖面单元分布如图 8 所示, 计算结果满足工程精度要求。

四、结 语

在水电工程中, 水工结构物几何形状复杂多变, 用一般的单元网格生成方法处理比
较困难, 因此, 设计适合水电工程特点的网格生成方法, 能收到很好的效益。本程序使
用的方法, 还为实现土石坝分步加载非线性分析的网格生成提供了基础。

参 考 文 献 (略)