

DDA 程序二次开发及工程应用

何传永

(中国水利水电科学研究院 岩土所, 北京 100044)

摘 要: 在石根华先生 DDA 程序的基础上, 中国水利水电科学研究院作了二次程序开发, 实现了 Windows 用户界面, 丰富了前后处理的功能, 计算中也可以模拟边坡的开挖过程。介绍了程序的新功能、新特点以及程序在向家坝重力坝抗滑稳定性研究中的应用。

关 键 词: DDA 程序; 二次程序开发; 抗滑稳定性

中图分类号: TP 319; TV 223

文献标识码: A

Redevelopment of DDA program and its application

HE Chuan-yong

(Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The Dos-based DDA program originally developed by Dr. Shi has been upgraded into the Windows-based version by China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) recently. In this new version of DDA program, user-friendly pre-processing and post-processing are developed, and the process of slope excavation can be simulated. An application of the new program to analyze the stability against sliding of Xiangjiaba gravity dam is presented.

Key words: DDA program; secondary program development; secondary program development; stability against sliding

1 引 言

非连续变形分析方法 DDA 是一种全新的数值计算方法^[1], 石根华先生编制的 DC、DF、DG 三套程序完成了 DDA 方法的前处理、计算和计算结果显示。但这三套程序的用户界面类似于 DOS 界面, 不能与用户交互操作。在实际工程应用中, 几何形状、边界条件和荷载比较复杂, 应用中存在一定的困难。此外, DC 程序在生成块体时, 块体的材料编号是由“joint”的材料编号所决定的, 如果块体周边有多种“joint”材料, 块体的材料编号就是不确定的, 在块体数目较多的情况下, 很难检查 DC 程序生成块体材料的正确与否。因此, 要将 DDA 应用到复杂的水电建设工程中, 需要在 DDA 程序的基础上作一些改进。

中国水利水电科学研究院在 DDA 程序的基础上作了二次程序开发, 用 Visual C++ 将 DC、DF、DG 三个程序融入一个程序中, 用交互方式对前后

处理作了大幅改进, 朝 DDA 程序工程实用化方向前进了一步。具体工作内容如下:

(1) 直接读取工程 CAD 图形的 DXF 文件读取, 自动生成 DC 程序所需的几何数据, 完全省去了繁琐的几何数据准备工作。

(2) 实现交互方式操作 bl* 文件, 编辑块体材料编号“joint”材料编号; 编辑约束点、测量点; 输入集中荷载数据, 给出浸润线, 自动计算结构面水荷载值及作用点。

(3) 增加了多开挖步功能, 可以模拟边坡开挖过程中的稳定状态。

(4) 丰富了后处理功能, 仿照目前流形的商业程序, 实现了位移和应力的彩色云图。

2 前处理程序

2.1 图形生成

程序用下拉菜单来实现各项功能, 主菜单的 Pre 项包含前处理的全部功能, 如图 1 所示。

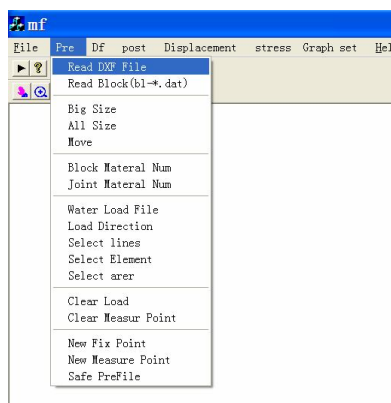


图1 Pre 菜单功能显示
Fig.1 'Pre' menu function

点击“Read DXF File”项, 程序弹出输入、输出标准对话框。选中您要输入的 AUTOCAD 的 DXF 格式文件, 按 OK 键, 程序自动读入 DXF 文件, 生成 MC.EXE 所需的全部几何数据, 然后自动链接 MC.EXE 执行程序。MC.EXE 执行程序运行结束后, 控制立即回到本程序, 显示生成的块体。

可以用菜单项“Big Size”, “All Size”和“Move”来放大或移动图形, 检查块体图形的细部。当选择“Big Size”, 按下光标左键, 拖动光标, 显示一黄色的方框, 松开左键, 即放大显示所选区域; 选择“Move”, 按下左光标键, 拖动光标, 则图形随着光标的移动而动。

2.2 块体和 joint 材料号编辑

选择“Block Material Num”菜单项, 程序弹出材料编号对话框, 在编辑栏中给出块体材料号, 按 OK 键, 回到图形中, 将光标移向需编辑材料号的块体, 点击左光标键, 该块根据指定的材料编号, 显示设定的色彩。

选择“Joint Material Num”菜单项, 块体中的充填色消失, 仅显示“joint”线段, 就可以编辑“joint”材料号了, 此时弹出一对话框, 给出“joint”材料号, 按 OK 键, 移动光标至需编辑的线段, 该线段自动发亮, 点击左光标键, 该线段根据 joint 材料号设定指定的颜色, 通过交互的方式, 完成 joint 材料号的编辑工作。

2.3 荷载

荷载的输入有两种方式, 一种是通过读入荷载文件, 比如坝基仰压力线、边坡坡外水位线, 数据稍多, 采用文件输入的方式; 简单的荷载则用交互式输入方式。

点击“Water Load file”菜单项, 程序弹出标准的输入输出对话框, 选择水荷载文件, 按 OK 键。荷载的编辑有 3 种方式:

(1) 点击“Select lines”菜单项, 是选择线段计

算和施加荷载, 移动光标至需编辑的线段, 该线段自动发亮, 点击左光标键, 程序自动计算该线段的荷载值和作用点, 标注在图形上。

(2) 点击“Select element”菜单项, 程序自动计算该块体单元内各线段的荷载值和作用点, 标注在图形上。

(3) 点击“Select area”菜单项, 是选择一个区域计算和施加荷载, 程序自动计算该区域各单元内各线段的荷载值和作用点, 标注在图形上。

还有一种荷载输入方式是交互方式, 点击“Load direction”菜单项, 程序弹出“Load direction”对话框, 有 5 种选择, 分别是“left”, “right”, “up”, “down”和“water”, 代表作用力的方向。根据需要选择其一, 按 OK 键, 回到图形画面中, 移动光标, 屏幕左上角显示光标在图形的坐标值, 选定位置后, 点击左光标键, 弹出一对话框, 显示当前光标的图形坐标, 如果坐标不够精确, 重新输入坐标值及在该点的均布力值, 按 OK 键, 用同样的过程, 给出均布荷载另一端荷载坐标及值, 然后点击“Select lines”菜单项。移动光标至力作用的线段上, 点击左光标键, 程序自动计算线段上的荷载值和作用点, 标注在图形上。

2.4 固定点和测量点设置

因为数据是从 DXF 文件中直接读取, 生成的块体文件不包含固定点信息和测量点信息。必须在前处理程序中进行选定, 选择“New Fix point”菜单项, 将光标移至需要设置固定点位置, 点击左光标键, 图形上显示一个彩色小圆点, 就在该处设置了一个固定点。

选择“New Measure point”菜单项, 将光标移至需要设置测量点位置, 点击左光标键, 图形上显示一个彩色小圆点, 就在该处设置了一个测量点。

如果在已经准备好了计算数据, 需要计算不同的工况, 变更不同的荷载, 计算不同的测点, 可以清除荷载和测量点。点击菜单项“Clear load”, 清除所有的荷载项; 点击“Clear measure point”菜单项, 清除全部的测量点, 可重新输入和设定荷载, 重新设定测量点, 为下一步计算作准备

2.5 保存数据

当数据编辑完成后, 选择“Save profile”菜单项, 将数据保存在 bl-*.dat 的文件中, 这里*代表 DXF 文件的前缀名。

2.6 读取块体数据

如果完成了 bl-*.dat 的编辑并保存了该文件, 下次再修改数据时, 选择“Readblock(bl-*.dat)”, 直接编辑数据就可以了, 不必重复上述工作。

3 DDA 计算

在 DDA 计算中,需要读入两个文件,一个是前处理生成的块体几何文件 bl-*.dat,另一个是计算控制参数文件 df*,选择菜单项,显示图 2 对话框,可以对弹簧刚度、计算步数、计算最小误差等参数进行修改。

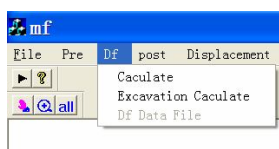


图 2 “Df”菜单功能显示
Fig.2 ‘Df’ menu function

菜单项 Calculate 是进行非开挖工况计算,DDA 计算 DF 程序已被移植成 Visual C++程序,不像 DC 程序是镶嵌在本程序中的执行程序。

菜单项 Step df 是执行开挖工况的 DDA 计算,可模拟工程边坡的多步开挖过程。

4 DDA 后处理功能

在 DDA 后处理功能 DG 程序的基础上,实现了用户交互方式对计算结果图形的控制。

主菜单“post”如图 3 所示,包括以下功能:Read dgd file 是读入后处理文件;Read step plot 读入分步开挖计算结果文件。

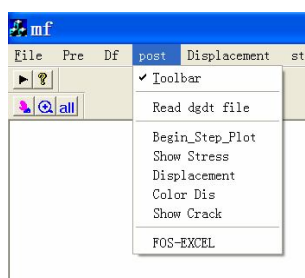


图 3 Post 菜单功能显示
Fig.3 ‘Post’ menu function

如果要看块体的运动状态,点击工具栏中的小三角形,动画显示的速度是可以随意调整的。

如果想看迭代第 N 步时的运动状态,可以点击主菜单 Gragh 下的 N step,图形显示 N 迭代步的块体运动状态,因此,要看任何一迭代步的计算结果都是随意的,这对整理计算结果有帮助。

菜单项 Color Dis 是色颜渲染图方式显示位移矢量^[2],色颜模式分为以下 4 种:

(1)R-B 过渡色颜模式,颜色是从蓝过渡到红,位移最小的显示蓝色,位移最大处显示红色,最大

和最小位移之间分 20 等份,用图右边 20 个小色块表示,旁边标注色块相对应的位移量;(2) RGB 过渡色颜模式;(3) RYB 过渡色颜模式;(4) BGY 过渡色颜模式。

4 种色彩模式可根据个人喜好,任选一种。

菜单项 FOS- EXCEL 是将 DGD 计算结果文件中的各迭代步的安全系数读出来,转换成 FS.TXT 文件,再用 EXCEL 图形功能画出迭代收敛曲线,方便检查迭代收敛情况和最终的安全系数。

用户在整理计算结果时,除了关心位移矢量图外,还关心水平方向位移和垂直方向的位移。主菜单项 Displacement 提供了显示水平方向和垂直方向位移的功能(图 4),同样是有 4 种色彩模式可供选择。主菜单 Stress 提供了 4 种显示结果,Small principle stress,显示最小主应力。Big principle stress,显示最大主应力。X string,显示 X 方向应力。Y string,显示 Y 方向应力。

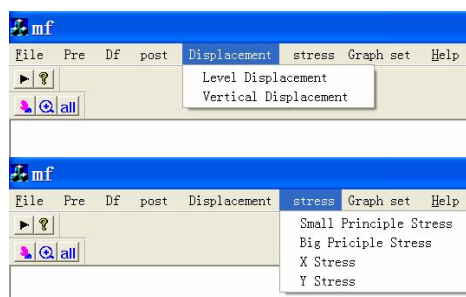


图 4 “Displacement”菜单功能显示
Fig.4 ‘Displacement’ menu function

对各项应力显示,同样是 4 种色彩模式可供选择。图形右边显示各种色彩对应色块的应力标示值。图 5 是一边坡的位移彩色渲染图。

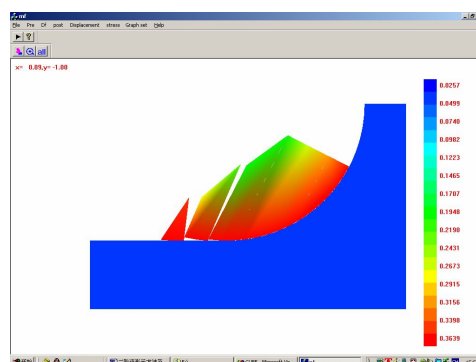


图 5 R-B 过渡色颜模式位移彩色渲染图
Fig.5 The displacement diagram by R-B transitional color mode

5 工程应用

5.1 工程背景

二次开发的 DDA 程序应用于向家坝重力坝深

层抗滑稳定等工程中。向家坝水电站是金沙江流域水利资源梯级开发的最后一级水电站。为混凝土重力坝,坝顶长度为 897 m,最大坝高 161 m。重力坝建在三迭系砂岩地层上。其中在坝址区出露的基岩主要为三迭系上统须家河组 T_3^{nj} 的砂岩夹泥质岩石,系河湖、沼泽相沉积的砂岩、泥岩含煤地层。岩性岩相变化大,交错层理发育。按沉积规律和岩性特征,须家河组可分为 4 大岩组 $T_3^1 \sim T_3^4$,其中 T_3^1 、 T_3^3 岩组泥质岩石含量相对较多, T_3^2 、 T_3^4 岩组以厚层砂岩为主。作为坝址区工程地质中的一个主要特征,立煤湾膝状挠曲从西北角的左岸立煤湾沟进入坝址区,延伸到坝址东南角,斜贯坝址,长度约为 2 km。立煤湾膝状挠曲带从西北角的左岸立煤湾沟进入坝址区,延伸到坝址东南角,与坝轴线呈斜交状态。受此挠曲带的影响,坝址区基岩部分岩体条件较差,特别是近 100 m 宽的挠曲带核部斜穿坝址区,造成挠曲带岩层陡倾、层间错动、破碎夹层和节理裂隙发育,岩体完整性差。除此之外,坝基岩体存在有两条一级和 10 余条二级中缓倾向下游且贯通性好的软弱夹层,构成了重力坝深层滑动的控制性结构面这一挠曲构造导致重力坝坝基岩体破碎,软弱夹层发育。受地质构造的影响,下游基岩抗体中发育有倾向上游中缓倾角结构面,这些结构面与岩桥组合可能构成坝基深层滑动的另一可能的滑移通道,组成一典型的双面滑动模式。向家坝工程存在坝基深层抗滑稳定问题且问题相对比较突出,是工程设计中关键问题之一。

用 DDA 方法对向家坝泄 12 剖面进行重力坝深层抗滑稳定研究,泄 12 剖面是泄洪段一典型剖面,如图 6 所示。

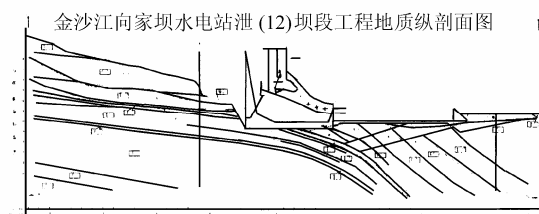


图 6 泄洪 12 坝段工程地质剖面图
Fig.6 Engineering geological section of flood discharge dam #12

5.2 建立 DDA 数值模型

有了新的前处理程序,建立计算模型变得十分容易:在 CAD 图上建立一新图层,只需用线段或多线段在图上重新描绘一遍,对工程地质剖面图适当的作些简化。用不同的线段颜色代表不同的 joint

材料号,描绘完毕后,关闭其他图层,将新描绘线段的图形拷贝到一个新文件,以 DXF 格式存储;打开新 DDA 程序,程序自动读入 DXF 文件,生成 MC.EXE 所需的全部几何数据,然后自动链接 MC.EXE 执行程序。MC.EXE 执行程序运行结束后,控制立即回到本程序,显示"MC"生成的块体文件 bl*.dat。图 7 是自动生成的泄 12 剖面的 DDA 数值模型。

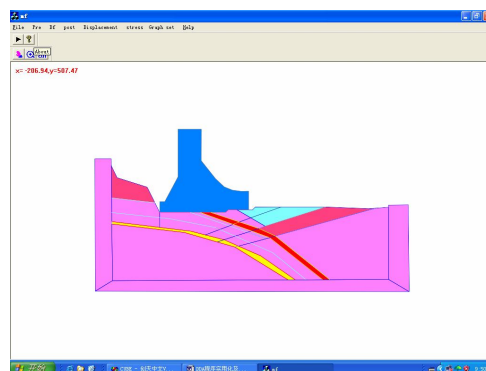


图 7 自动生成的 DDA 计算数值模型
Fig.7 Automatic generated DDA numerical model

因为 MC.EXE 生成块体材料号是根据 joint 材料号生成的,对于比较复杂的地质模型,不能保证块体材料的编号的正确性,可以用交互式的方式对块体和 joint 材料编号进行编辑,图形中以不同的色块颜色代表不同的块体材料号,以多种颜色线段代表各种 joint 材料号,因为 DDA 中一个几何点代表多个节点,不便于显示检查,所以采用光标移动的方式来查找单元号和节点号。随着光标的移动,屏幕左上角显示光标所在的坐标值、单元号、单元材料号、最近 joint 编号、joint 材料号,通过检查,方能保证计算数值模型的正确性,保证计算结果的可靠性。图 7 中不同的色块代表不同的块体材料号,不同的线段颜色代表不同的 joint 材料编号。

由于几何模型是直接从 CAD 图形转换过来的,还必须通过鼠标给出固定点,测量点。

按照水工建筑设计规范(DL5077-1997),坝基和消力池地基整体扬压力分布如图 6 中所示。计算工况为正常蓄水位,上游水位为 380.0 m,下游水位为 265.8 m。程序对于多点的水荷载,采用读入荷载控制点文件的方式,文件格式是顺序给出各控制点的坐标值及荷载值。

程序根据荷载控制点数据自动计算光标所指块体单元内各线段的荷载值和作用点,作为集中力,标注在图形上,并生成 DDA 格式的荷载文件。DDA 计算的数据就基本准备好了,整个 DDA 数值模型

的建立过程全部是自动或交互方式完成, 非常方便快捷。

向家坝重力坝抗滑稳定计算力学参数列在表 1 中。

表 1 向家坝重力坝抗滑稳定分析力学参数表
Table 1 Mechanical parameters for stability analysis of Xiangjiaba gravity dam

岩体和结构面类型	变形模量 / GPa	泊松比	内摩擦角 / (°)	内聚力 / MPa	抗拉强度 / MPa	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
II 岩体	20	0.22	43.2	0.53	3	26
III ₁ 岩体	11.75	0.25	37.4	0.38	2.35	26
III ₂ 岩体	9.25	0.28	34.2	0.305	1.65	26
IV 岩体	4	0.3	27.2	0.17	1	26
JC2	0.72	0.4	15.4	0.045	0	23
断层	1.28	0.4	16.7	0.06	0	23
砼	20	0.167	56.3	2	1.85	24
岩体混凝土接触面			38.7	0.38	2.35	

5.3 工程计算

泄 12 剖面存在 JC2、JC3、JC4 等多条软弱带, 地质结构比较复杂, 存在多种潜在滑动面。如何确定真正安全系数最小滑动面是工程分析的关键, DDA 方法的最大优势在于, 它满足牛顿定律, 满足运动方程, 可以采用增加荷载或折减抗剪强度参数两种方法, 使结构处于破坏状态, 使结构真正动起来, 非常直观地看到结构最先从何处破坏、破坏过程及失稳状态。向家坝计算采用增加荷载的方法, 将水平荷载增加若干倍, 使大坝处于失稳状态, 如图 8 所示, 以确定测量点的设置。

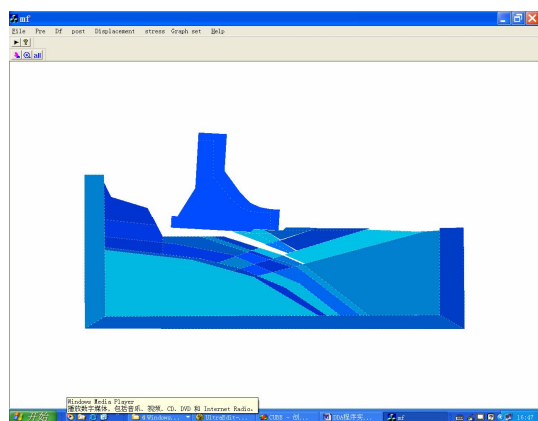


图 8 超载时坝体失稳模式
Fig.8 Instability mode of dam under over loading

重力坝的荷载除重力外, 主要是作用于坝上游面的水平荷载和作用于岩基内的渗透荷载, 按照水工建筑设计规范, 假定坝基整体扬压力折线分布, 计算中岩体内任一点的渗透压力为该点到浸润线的垂直高度。

为了研究渗透压力对坝体稳定影响的作用机制, 水荷载在岩基内采用两种加载方式。一种是仅仅考虑将水荷载施加在指定的滑动面上, 荷载相同, 作用方向相反, 计算安全系数为 2.390; 另一种加载方式是将岩基内所有的 joint 上都施加水荷载, 荷载相同, 作用方向相反。计算安全系数为 2.419。通过比较可以发现, 两种岩基内渗透荷载的加载方式计算安全系数相近, 都是合理的。有限元计算中, 由于计算模型复杂, 常采用第 1 种加载方式。

新 DDA 后处理程序将迭代过程中的安全系数记录下来, 形成一单独文件 FS.TXT, 可以用 EXCEL 画出迭代收敛曲线, 经过大量计算, 发现收敛曲线有一定的规律性。通过分析收敛曲线, 可以分析 DF 程序几个关键参数的选取合理性。安全系数的收敛曲线如图 9 所示。

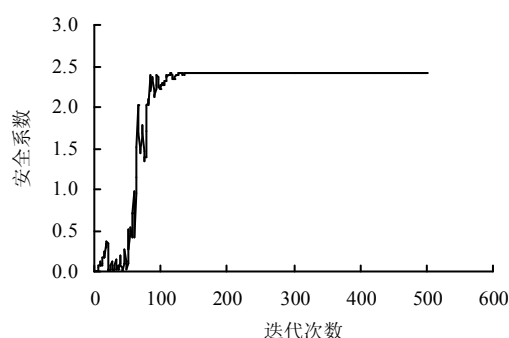


图 9 安全系数收敛过程曲线
Fig.9 Convergence curve of safety factors

6 结 语

感谢石根华先生赠送的 DDA 程序, 笔者在 DDA 程序基础上将在 DC、DF、DG 3 个程序融为一体, 进行了二次程序开发, 用自动和交互方式对前后处理作了大幅改进。新 DDA 程序应用到向家坝、龙口等重力坝深层抗滑稳定的分析计算中, 应用于克孜尔倾倒变形边坡的反分析和裂缝数值模拟, 使用十分方便, 提高了效率。程序在使用过程中有待继续完善。