

坝肩稳定及边坡稳定分析软件 EASA 2006 介绍

武世婷¹ 赵文光² 郑超¹ 张建海¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 介绍了坝肩稳定及边坡稳定分析软件 EASA2006 程序, 该程序在 EASA2002 程序的基础上进行升级, 新程序实现了在 Windows 环境下的对话框可视化操作, 增加了帮助提示信息, 解决了 EASA2002 程序数据文件和可执行文件必须在同一目录下才能被调用的问题, 丰富了输出 CAD 图形的图层操作。通过在锦屏水电站混凝土双曲拱坝坝肩稳定计算中的成功应用, 对程序进行了验证, 表明 EASA2006 程序稳定、可靠, 计算结果可以满足工程设计要求。

关键词: 坝肩稳定分析; 刚体极限平衡法; 可视化操作; 锦屏双曲拱坝

中图分类号: TV640.39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-764X(2007)S2-0086-03

1994 年 7 月国家电力公司成都勘测设计研究院开发完成了复杂地基开挖计算及稳定分析程序系统 EASA94, 解决了边坡稳定及坝肩稳定分析中人工计算工作量大、效率过低的难题。1997 年、2002 年成都勘测设计研究院和四川大学水利水电学院共同开发和完善了 EASA94 程序, 完成了程序的系统集成, 从而形成 EASA2002 坝肩稳定及边坡稳定分析系统。

EASA2002 共计 20 000 余条语句, 用 C 语言编写, 可以用于各类边坡及坝肩开挖的开挖方量计算、开口线坐标计算及其相应的绘图; 边坡稳定和坝肩稳定分析的失稳岩体(二面、三面切割)自动切割、作用荷载(自重、渗压、坝肩推力)计算及其相应的绘图, 能够进行阶梯状滑块的自动剖分, 形成滑块图, 并能按统一格式进行数据转换处理; 能自动根据坝肩推力的输入数据文件, 计算作用在滑块上的、由坝体传来的推力等^[1]。自 2002 年程序投入使用以来, 先后在锦屏、溪洛渡、大岗山、双江口、长河坝、双河电站等工程的坝肩稳定分析中得到应用, 在工程的各个设计阶段中发挥了巨大的作用。

2006 年, 成都勘测设计研究院和四川大学水利水电学院对 EASA2002 进一步升级为 EASA2006, 使得程序适应性更强, 可以满足不同复杂地质条件和复杂计算条件的需要, 界面更为友好, 更利于程序的推广应用。

本文简要介绍 EASA2006 程序的算法原理及程序功能, 着重介绍升级后 EASA2006 程序的新特点,

并通过锦屏水电站混凝土双曲拱坝坝肩稳定计算算例演示程序运行过程及计算结果。

1 EASA2006 程序的算法原理

1.1 刚体极限平衡法计算假定

现行拱坝设计规范及水工建筑物抗震设计规范均规定, 在拱坝的设计中, 拱坝坝肩稳定的数值计算方法以刚体极限平衡法为主。刚体极限平衡法坝肩稳定计算采用以下的基本假定:

- a. 按拱坝作用在滑动块体上的荷载之和计算拱坝传递的推力, 不考虑各可能滑动块体位移时大坝工作情况的改变与坝基抗滑稳定间的相互作用。
- b. 可能滑动块体边界面上的渗压不随着块体达到极限平衡状态的位移过程而改变。
- c. 可能滑动块体按刚体考虑, 只能产生整体移动或转动, 只考虑作用在块体上的力的平衡。
- d. 可能滑动块体的各个滑动面同时达到极限平衡状态, 面上的剪力与滑动方向平行, 指向相反, 数值达到最大值, 对于一个滑动面, 不单独考虑面内可能的强度不均匀性。

1.2 EASA2006 程序的计算公式

刚体极限平衡法稳定分析中采用以下 2 个基本计算公式:

a. 剪摩公式:

$$K_1 = \frac{\sum (Nf_i + c_1A_i)}{\sum T_i} \tag{1}$$

b. 纯摩公式：

$$K_2 = \frac{\sum N f_2}{\sum T_i} \quad (2)$$

式中： K_1 为抗滑稳定剪摩安全系数； K_2 为抗滑稳定纯摩安全系数； N 为垂直于滑动方向上的法向作用力； T 为平行于滑动方向上的滑动力； A 为滑动面的面积； f_1 、 c_1 为分别为摩擦系数和黏聚力，按相应材料的峰值强度采用； f_2 为摩擦系数，根据材料的特性取值。对于脆性破坏材料，采用比例极限；对塑性或弹塑性破坏材料，采用屈服强度；对已经剪切错断的材料，采用残余强度^[2]。

用于对包含坝踵上游拉裂面的双面滑动块体、三面滑动岩体、双面阶梯状滑动岩体、三面阶梯状滑动岩体进行块体切割计算时，程序运行需要输入数据文件，定义各个滑动面的走向、倾角、面上任意点的位置坐标以及坝体上游坝踵拉裂面折线。

虽然刚体极限平衡法公式(1)(2)形式较简单，但在实际工程运算中，完全通过人工在地形图上切割面、画剖面图、求面积、算方量来完成，计算十分烦琐，工作量大，而且容易出错。成都勘测设计研究院与四川大学水利水电学院经过多年研究，合作开发了EASA2006软件，实现了在较短时间内对拱坝坝肩稳定状况作出较全面的分析，很好地解决了上述难题。

2 EASA2006 程序的主要功能

- a. 空间三维地形模拟显示。将三维地形用平面网格和高程坐标控制，用系列平面拟合地形曲面。
- b. 开挖边坡的开口线坐标计算、任意切割面面积计算、切割形状图形显示和开挖方量计算。
- c. 拱坝坝肩失稳岩体的自动切割。程序能够对包含坝踵上游拉裂面的双面切割的失稳岩体、三面切割失稳岩体、双面切割阶梯状失稳岩体、三面切割阶梯状失稳岩体进行块体切割计算。输入各滑动面的走向、倾角、面上任意点的位置坐标以及坝体上游坝踵拉裂面的定义折线，程序便能对块体能否切出进行判断并自动切出块体，绘出该块体的平面投影图及从各个切割方向剖切该块体时的剖面形状、面积等。
- d. 失稳岩体上作用荷载的计算。①输入岩体容重，调用相应模块计算岩体的体积和自重荷载。②块体上作用渗压的计算可采用下列两种方式：输入上下游水位及其各个滑动面上的渗压分布模式，调用相应模块计算各滑动面的面积及渗压，绘出相应的形状显示图。对于进行了坝区渗流场分析的情况，输入坝区渗流场分析成果，计算各个滑动面上作

用的渗压。通过该项功能，可以比较不同的坝基防渗排水设计方案，滑动块体上渗压的变化情况，分析比较不同防排方案对坝肩稳定的影响。③输入通过坝体应力分析得出的坝肩推力沿坝基不同计算高程的分布，计算作用在滑动块体上的坝体推力合力。

e. 三维刚体极限平衡法坝肩稳定安全系数计算。完成可能滑动块体切割及块体上作用荷载的计算以后，输入各个滑动面上的岩体力学参数，分别根据纯摩和剪摩计算公式，采用韦伯顿矢量法计算块体滑动形式及抗滑稳定安全系数。

3 EASA2006 程序的新特点

3.1 用户界面的对话框可视化

EASA2002 程序针对设计上常遇到的开挖和稳定分析这两个工作量大、计算烦琐的问题，用计算机代替人工劳动，极大地缩短了计算时间，提高了计算精度。但是，程序缺少良好的用户界面，没有给出相应的帮助信息，给技术人员带来了不便。

Delphi 的可视化组件库(VCL)是一个开放的类库，本身功能强大，还可以允许用户扩展，自身提供了近百种部件来设计良好的界面^[3]。EASA2006 程序基于 Delphi 软件开发平台，利用了 Delphi 强大的可视化功能和丰富的组件库开发，实现了程序在 Windows 系统的操作平台下，用户界面的对话框可视化操作。同时，界面添加了对每个计算步骤所需提供的数据文件生成及输出的数据文件的提示和详细说明，便于程序的使用。

双击 EASA2006 程序可执行程序图标，程序运行显示如图 1 所示。点击各功能按钮，右边的提示信息将对各个功能模块的功能、输入输出格式以及程序运行注意事项做了详细说明。例如点击地形网格(原 setup1)按钮，显示地形网格界面，点击应用按钮，程序将自动完成计算工作。

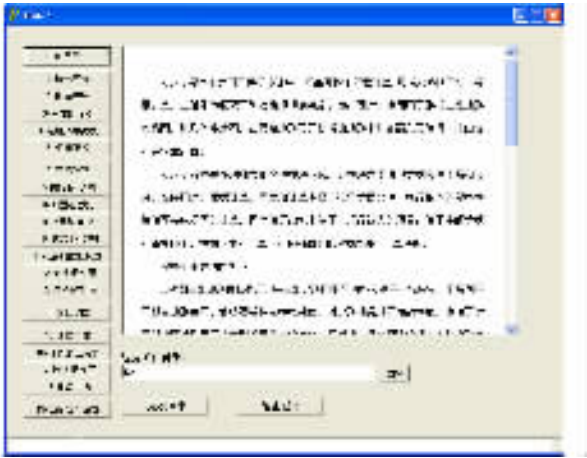


图 1 目录界面显示

3.2 创建目录文件来记录工作路径

程序解决了 EASA2002 程序中数据文件与可执行文件必须在同一目录下才能被调用的问题。EASA2002 程序中,文件调用命令使用的是相对路径,因此,数据文件必须与可执行文件放在同一目录下才可以被调用。EASA2006 程序对此进行了一些完善,在一固定位置(例如 C \ :)创建目录文件来记录工作路径,然后在程序每个调用文件处添加这一工作路径,它与文件名共同构成绝对路径,这样,数据文件和可执行文件不用放在同一目录下也可以调用。

3.3 丰富输出 CAD 图形的图层操作

程序在计算得到的 CAD 输出图形中,地形网格、一级坝肩开挖地形、二级开挖地形被分别放在一层上,滑块剖面也是分层放置的,提高了图形的可用性。

4 锦屏水电站混凝土双曲拱坝坝肩稳定计算

4.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省盐源县与木里县交界的雅砻江干流上,坝址位于普斯罗沟与手爬沟间 1.5 km 长的河段上,河道顺直而狭窄,河流流向约 N25°E。两岸基岩裸露,岩壁耸立,为典型的深切“V”形峡谷。左岸为反向坡,1 900 m 高程以下为大理岩,地形陡立,坡度 70°~90°,1 900 m 高程以上出露砂板岩,地形坡度约 45°。坝肩发育有 F₅、F₈ 及 F₂ 等断层,T_{2-3Z}^{α6}顺层挤压带及深部裂缝,除此之外在浅表部卸荷带内还发育有大量的走向 NE 倾向 SE 卸荷裂隙以及与卸荷裂隙同向的裂隙。右岸为大理岩组成的顺向坡,1 810 m 高程以下谷坡陡峭,坡度 70°~90°,1 810 m 高程以上地形相对较缓,坡度约 40°。坝肩发育有北东向陡倾山里的 F₁₃ 断层、F₁₄ 断层及倾向山外偏下游中缓倾角的顺层绿片岩透镜体夹层。混凝土双曲拱坝坝顶高程 1 885.00 m,河床部位拱坝建基面高程 1 580.00 m,最大坝高 305.00 m^[4-5]。

4.2 主要计算内容

- a. 锦屏一级水电站坝区三维地形网格数据文件及二维、三维地形网格图形生成。
- b. 锦屏一级水电站双曲拱坝坝基开挖,包括开挖图及工程量计算。
- c. 锦屏一级水电站双曲拱坝坝肩稳定块体组合。
- d. 块体上作用的外荷载计算。
- e. 稳定安全系数计算。

4.3 计算过程

4.3.1 地形网格生成

稳定计算网格坐标与拱坝坐标的关系如图 2 所示(图中 x'O'y' 坐标系为拱坝坐标系,xOy 坐标系为锦屏地形输入坐标系)。

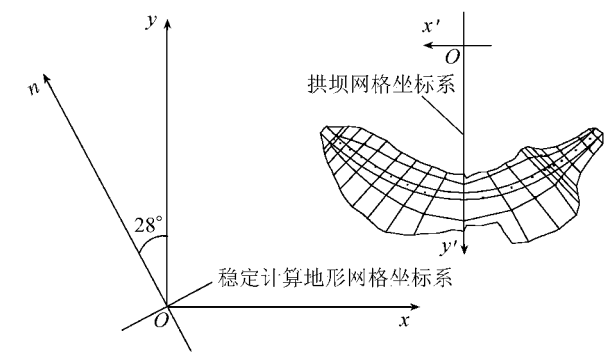


图 2 坐标系

锦屏工程坝区三维地形采用规则矩形地形网格,每个网格单元边长为 30 m×30 m,网格区域转角为 0°(网格区域中 y 轴逆时针方向旋转 28°为 n 方向),横河流方向为 x 方向,长 1 500 m,共有 50 个单元,顺河流方向为 y 轴方向,长 1 920 m,共有 64 个单元。

4.3.2 坝基开挖

坝基开挖及工程量计算,输出三维地形网格图、拱坝坝基开挖计算及计算输出的开挖图。锦屏拱坝坝基开挖计算,拱坝坝基面分为 18 个单元(编号顺序:从左岸到右岸),上下游开挖边坡为 1:0.4,河床开挖边坡为 1:2.5,采用一坡到底的开挖方式。

拱坝坝基开挖计算输出开挖图及开挖剖面图。开挖计算得出的开挖区域开口线平面范围输出典型剖面。采用了计算及手工复核,表明程序计算及图形输出正确,满足工程上的计算要求。

4.3.3 拱坝坝肩稳定块体切割计算及作用荷载计算

拱坝坝肩块体计算输入数据,输出图形。根据结构面产状及结构面组合,建立块体切割输入数据文件 mmbk.inp,计算得出—陡—缓、两陡—缓、阶梯块 3 种块体形式,得到相应的图形输出,例如左岸阶梯块体输出图见图 3。

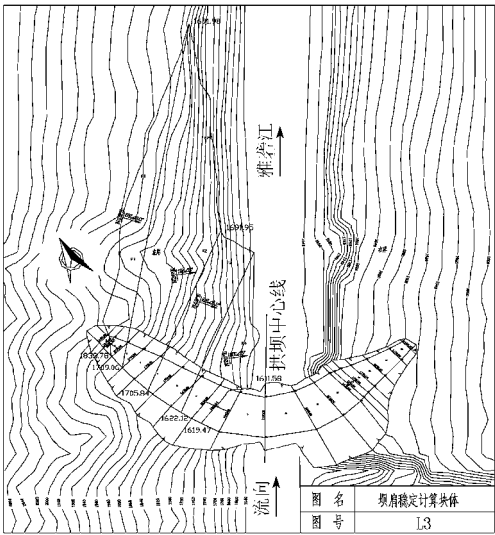


图 3 左岸阶梯块体输出图示例

(下转第 125 页)

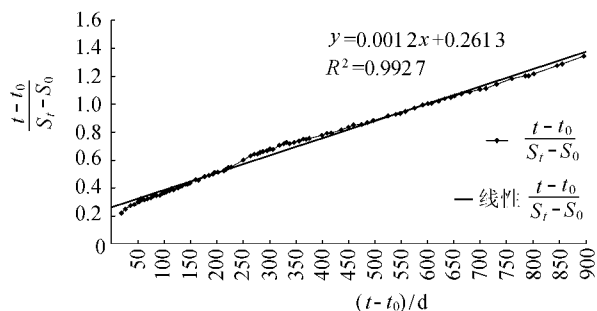


图2 右堤7+120断面 $\frac{t-t_0}{S_t-S_0} \sim (t-t_0)/d$ 相关曲线

4 结 论

从表1~4可以看出,随着观测期限的延长,相关系数 R^2 越来越大,所计算的最终沉降量也越来越接近。因此,可根据工程实际情况预先设定 R^2 值,在观测进程中定期跟踪计算 R^2 值,与选定的 R^2 数值进行比较,以决定是否停止观测,从而免除不必要的观测期,以节省工程投资。如本工程若选定 $R^2 > 0.95$,则各断面达最大恒载后的必要继续观测天

数分别为:右堤7+120断面180d(只占达最大恒载后观测总天数的20%),左堤6+670断面360d(占达最大恒载后观测总天数的44%),右堤5+900断面180d(占达最大恒载后观测总天数的20%)和右堤6+400断面360d(占达最大恒载后观测总天数的40%)。其推算的最终沉降量与用全程观测数据推算的最终沉降量相差不大(8%左右),因此至少可以减少1.5a的观测期,占达最大恒载后观测总天数的60%。这样,本工程预留沉降量,根据当 $R^2 > 0.95$ 时用双曲线法计算的最终沉降量,再加上10%~15%就足够安全了。

参考文献:

- [1] 祝龙根,刘利民,耿乃兴.地基基础测试新技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 梁慷,陈国华.木兰溪防洪一期工程施工监测[J].水利科技,2005(3):24-25.

(收稿日期 2006-10-12 编辑 熊水斌)

(上接第88页)

在计算中,主要对于切出的滑动块体形状、块体出露线坐标进行手工及CAD制图复核计算,表明程序输出的计算结果及相应图形正确。

根据运行提示输入相应参数,运行程序,进行拱坝坝肩块体重量计算、各面渗压计算、坝肩推力计算和拱坝坝肩块体上作用荷载计算。对以上各种荷载计算结果进行各个计算步骤的复核,程序计算结果正确无误,满足工程设计要求。

4.3.4 拱坝坝肩块体稳定计算安全系数计算

拱坝坝肩块体稳定安全系数计算调用STcc.exe程序,根据以上荷载计算的结果,得出各个滑动块体的安全系数。对计算得出的各个滑动块体的坝肩稳定安全系数,采用手工复核的方式及其他稳定计算程序,进行全面的对比分析核算,表明程序中的稳定安全系数计算成果正确。

5 结 语

对EASA2002坝肩稳定及边坡稳定分析系统进行了改进和完善后的EASA2006具有以下新特点:

a. 程序实现了在Windows环境下的对话框可视化操作,并添加了对每个计算步骤所需提供的数据库文件及生成与输出的数据库文件的提示和详细说明。

b. 解决了EASA2002程序中数据文件与可执行

文件必须在同一目录下才能被调用的问题。

c. 丰富了输出CAD图形的图层操作。

新的坝肩稳定分析程序提高了程序的计算效率、使用的简便性和适应性,完善了程序的界面,功能齐备、使用可靠、操作方便,可极大地提高设计效率和设计水平,并具有更为广阔的推广应用前景。

程序应用于锦屏水电站可研阶段双曲拱坝坝肩稳定计算,经人工复核、程序对比计算复核、关键计算步骤的作图复核及宏观判断,各个计算步骤的分析结果合理性分析等综合复核,表明程序的计算结果正确,程序提供的开挖计算结果满足工程设计要求。

参考文献:

- [1] 复杂地基拱坝坝肩稳定分析程序开发研究:EASA2002程序使用说明[R].成都:国家电力公司成都勘测设计研究院,四川大学水利水电学院,2003.
- [2] SL282—2003 混凝土拱坝设计规范[S].
- [3] 徐新华. Delphi 5 高级编程—IDE与面向对象编程[M].北京:人民邮电出版社,2000.
- [4] 何江达,林正伟,王启智.锦屏一级高拱坝结构特性及坝肩稳定分析[J].四川大学学报,2004,36(2):12-14.
- [5] 周维垣,陈欣.锦屏双曲拱坝整体稳定分析[J].华北水利水电学院学报,2001,22(3):31-33.

(收稿日期 2006-12-13 编辑 熊水斌)