溃坝洪水分析DB-IWHR使用手册

# 前言

过去50 年来，许多学者研究开发基于物理机制的溃坝模型，Christofano (1965)，Harris and Wagner (1967), Brown and Rogers (1977, 1981), Ponce and Tsivoglou (1981), SCS (1981), MacDonald and Langridge-Monopolis (1984), Costa (1985), Fread (1984a, 1988), Froehlich (1995a), Walder and O’Connor (1997), Singh et al., (1988), Wang and Bowles (2006), Macchione (2008), Chang and Zhang (2010), and Wu (2013)。这一方法基于流深、剪应力、堤坝材料等属性预测溃口特征、流量特征。在该类模型中包含泥沙和水的连续方程、运动方程以及考虑初始条件、边界条件的辅助方程，包括阻力方程、几何关系等。回顾已发表文章，我们发现，这些分析方法的架构都有是相同的，即包括以下三个基础问题： (1) 考虑库水损失和渠道释放的水量和水能的守恒；(2) 基于侵蚀率的土体材料的冲刷特性；(3) 采用边坡稳定分析的渠道侧壁的侧向扩展分析。现作一简要回顾。

溃坝洪水分析DB-IWHR电子表格是在Excel界面上，利用其强大的计算功能并结合VBA自主进行开发研制的具有一定创新性的溃坝洪水过程线的电子计算表格。该程序主要功能是通过流深、剪应力、堤坝材料等属性预测溃口特征、流量特征。可得到溃坝过程中溃口的洪水过程线、溃口的发展过程线等，为溃坝洪水分析及预警提供科学的参考依据。

# 基本原理

### 溃坝水力学计算基础

#### 溃口水力学条件

1. 溃口断面流量计算

溃口断面的流量不仅受到水流在垂直方向收缩影响，而且会受到侧向收缩的影响。由于下游河床很低，溃口出口水流可按自由出流考虑，这时溃口断面流量可用宽顶堰公式计算。



其中：*C*1—流量系数，理论值为1.7 m1/2/s（Singh）。以往的研究者采用的*C*1 值在1.3~1.7 m1/2/s之间（Jack）。基于大量的试验，Brater考虑了堰口的形状和收缩效应后，建议*C*1值的范围为1.43–1.69m1/2/s。*B*为溃口断面的宽度，*H*为库水位, *z*溃口处床面高程,*C*2为淹没系数，计算公式如下：





式中，h为溃口水深。



1. 宽顶堰示意图

2）溃口断面流速计算

当水流从水库进入溃口时，将出现一个水位的跌落水面，水位从*H*降为*h*，假定水库的水流流速*V*0和入口段的水头损失可以忽略不计，则有：





可得

式代入式，可得



式中，V为溃口断面流速。

#### 水量平衡

根据河道历史断面资料、现场测量以及遥感技术等方法，可以得到库容与水位关系：



其中*W*为库容，*H*为库水位高程，*Hr*为基准水位。故有





式中，*a*1、*b*1、*c*1分别为库容水位曲线拟合系数。

溃口流量可以通过单位时间内水库库容的损失来确定，因此



式中，*q*为入库流量。

根据质量守恒，可得水量平衡方程：



****

### 溃口起始冲刷条件

在恒定均匀流中，拖拽剪应力等于作用于泄流槽底上水体的有效重量，具体表达式为：



式中：—水的重度；—水力半径；—能坡。

通过曼宁公式，我们可以得到剪应力与流速之间的关系，其表达式为：



下面分两种不同启动方式的计算方法。

#### 根据流速确定起始冲刷条件

* 1. **粘性土根据流速确定起始冲刷条件**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **作者** | **经验表达式** | **主要参数** |
| 唐存本（1963） |  | *m*=6(天然河道)或*m*=4.7(*h/D*)0.06  *C*=2.9×10-4g/cm |
| 武汉水利水电学院（1900） |  | *h*为水深；*D*为颗粒直径；  为颗粒容重；为水容重 |
| 窦国仁（1999） |  | *hd*为用水柱高度表示的大气压力；  *δ*=3×10-8cm |

* 1. **砂性土根据流速确定起始冲刷条件**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **作者** | **经验表达式** | **主要参数** |
| 岗恰洛夫（1962） |  | *h*为水深 |
| 沙莫夫  （1952） |  | *D*为颗粒直径 |
| 张瑞锦（1900） |  | 为颗粒容重；为水容重 |

#### 根据剪应力确定起始冲刷条件

* 1. **粘性土根据剪应力确定起始冲刷条件**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **作者** | **经验表达式** | **主要参数** |
| Julian and Torres  (2006) |  | *P*：细粒含量 (%)<0.063 |
| Otsubo and Muraoko (1988) |  | *C*为凝聚力 |
| Smerdon and Beaseley(1961) |  | PI为塑性指数；D50为中值粒径 |

* 1. **砂性土根据剪应力确定砂性土起始冲刷条件**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **作者** | **经验表达式** | **主要参数** |
| Schoklitsch  (1914) |  | = 形状系数（=1球形颗粒；=4扁平颗粒）  *d* = 平均粒径（m）；*γs*= 泥沙容重（N/m3）；  *γ* = 水容重(N/m3)。 |
| Shields  (1936) |  | *d* = 平均粒径（m）  =*Re*\*=11.6*=* 剪切雷诺数；  *δ*= 层流底层厚度。 |
| Egiazaroff  (1965) |  | = 平均粒径（m） |
| Van Rijn  (1984) |  | *d* =平均粒径(m);  *s* = 相对密度;  = 运动粘度. |
| Soulsby  (1997) |  |
| Annandale  (2006) |  | φ = 内摩擦角 ( °)；  *ρ*s = 土体密度(kg/m3);  *ρ*w = 水密度(kg/m3). |

### 基于试验确定溃口的冲刷速率条件

冲刷模型即侵蚀率和剪应力之间的关系曲线。冲刷模型是溃坝研究的重要问题，冲刷问题包括抗冲流速和侵蚀速度两个方面，其中抗冲流速一定程度上决定了土石坝冲刷的起始时间和终止时间，并且是决定侵蚀速度的一个重要参数。我们在总结前人试验成果的基础上，结合实际工程信息将冲刷模型大体分为三类：线性规律模型；指数规律模型；双曲线规律模型。其中双曲线模型是结合唐家山堰塞湖实测资料以及前人资料归纳总结提出的。

#### 指数模型

对于无粘性土材料通常采用指数形式(Roberts et al., 1998; Gaucher et al., 2010)。



其中：—侵蚀率 mm/s, *τ*—剪应力 Pa, *t*—时间 s。

尽管指数模型在无粘性土材料的冲刷计算中广泛使用，但是通过指数形式函数的数学意义，我们发现随着剪应力的增加，冲刷速率难以控制，严重背离真实情况。

#### 线性模型

指数模型中，但b1取1时，侵蚀率和剪应力之间的就是简单的线性关系：



Hanson- Cook（1992）和Briaud（2008）都曾提出过此种线性模型。

#### 双曲线模型

在本文中，我们建议了一个双曲线模型，其形式如下：



其中：*v* —扣除临界剪应力后的剪应力，



*k*—在剪应力*τ*范围内允许接近的单位变换因子。

双曲线有一当*v*接近无限值时的渐进线，其值为。此处，*k*取100，表示*v*等于0时，曲线的斜率。该模型基于结构材料的理解而建立的，土体材料抵抗侵蚀时，不应有无限“强度”。

* 1. **不同土参数建议值**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *a* | *b* |
| 压实粘土 | 1.2 | 0.0001 |
| 坝体堆石 | 1.2 | 0.001 |
| 压实沙砾 | 1.2 | 0.0005 |
| 堰塞体 | 1.2 | 0.0007 |

### 基于泥沙动力学理论的冲刷率模型

#### Meye peter- Muller 模型

Meyer-Peter &Muller公式是应用较为广泛的泥沙输送计算公式之一，Fread在BREACH（1984、1988）模型、Bechteler&Broich(1991)等均采用了该公式计算泥沙冲刷率的问题。其计算公式经整理如公式（3）所示。



式中，—单宽泥沙冲刷率；—比重，；—重力加速度；

—水密度；—剪应力；—临界剪应力。

唐家山计算结果与实测值对比如图3所示。

#### Eintein-Brown模型

Einstein-Brown公式也是应用较为广泛的泥沙输送公式之一，Singh 在BEED（1989）模型中就采用该公式进行泥沙输送计算。其计算公式可整理公式（4）所示。











式中，—单宽泥沙冲刷率；—重力加速度；— *D*50直径；、的值分别按公式~计算求解。剪应力按公式计算。

唐家山计算结果与实测值对比如图3所示。

#### Du Boys模型

du Boys公式是Fread在breach（1988）模型中采用的泥沙输送方程之一，其计算公式经整理化简如公式（5）所示。



式中据表6查表取得。

唐家山计算结果与实测值对比如图3所示。

* 1. **Du boys 公式中的和**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 粒径(mm) | 1/8 | 1/4 | 1/2 | 1 | 2 | 4 | 备注 |
| (m3/N-m) | 0.852 | 0.5051 | 0.3061 | 0.1796 | 0.1056 | 0.06327 | =2600N/m3 |
| (Pa) | 0.7644 | 0.8134 | 1.0584 | 1.5288 | 2.4402 | 4.132 |

#### Englund-Hense模型

Englund-Hansen公式是MIKE11软件计算泥沙输送所采用的方法之一，其单位宽度的输沙率公式可整理如公式（5）所示。



式中，—单宽泥沙冲刷率；—比重，；—重力加速度；

— *D*50直径；—水密度；—剪应力；—流速。

唐家山计算结果与实测值对比如图3所示。

1. 唐家山实测数据与各泥沙冲刷模型对比图

### 溃口侧向崩塌条件

溃口底部不断地被刷深的过程中，两侧边坡发生崩塌失稳，侧面不断地扩大，其破坏形式很难统一，因此溃口发展的模拟是一个十分难以准确实现的过程。与以前的溃坝分析模型采用楔形体法，本程序计算过程中溃口侧向崩塌采用的是岩土工程中已经被广泛接受的滑动面分析方法：简化的Bishop法。本程序在计算过程中取水面的宽度为溃口的宽度。模拟过程总，随着下切深度的增加，溃口边坡的安全系数逐渐减小，直到到达临界值（大于在0.99-1.01），边坡发生沿圆形滑弧的失稳滑坡，导致溃口的宽度增加。根据STAB程序的生成文件，找到滑弧的圆心坐标和坡脚坐标（在滑弧上），根据两点坐标即可得到滑弧半径。另外在程序计算中，可以根据算的当时的水深，根据三角关系，即可得到水面宽度即溃口宽度。下面给出滑弧示意图和溃口宽度计算简图：





1. 溃口的侧向崩塌过程等效简化

关于侧向崩塌模拟过程和STAB-DB的使用方法，另有专文介绍。

## 程序数值计算实现

常规的计算方法(如：Fread, 1988; Singh, 1988a; Chang and Zhang, 2011)都是通过给定的初始时间*t*0和时间步长Δ*t*，计算相应的水位增量Δ*H*，冲刷深度Δ*z*和流速变化量Δ*V*。通过观察发现，一旦给定流速*V*，同样可以求出相应的Δ*H*、Δ*z*和Δ*t*。因此新的算法采用给定初始流速*V*0和流速增量Δ*V*。

### 计算公式

在某一流速步*V*0到*V*0 +Δ*V*，则平均流速为：



水位平均高程和溃口底部平均高程：





根据公式，计算平均流速：



其中：



因此一旦给出Δ*V*，即可得到*s*：



控制性方程可以表示成如下差分格式：

其中：可以通过式得到。

消除方程(20) 和 (21)中的Δ*t* 和Δ*H*得：



其中：









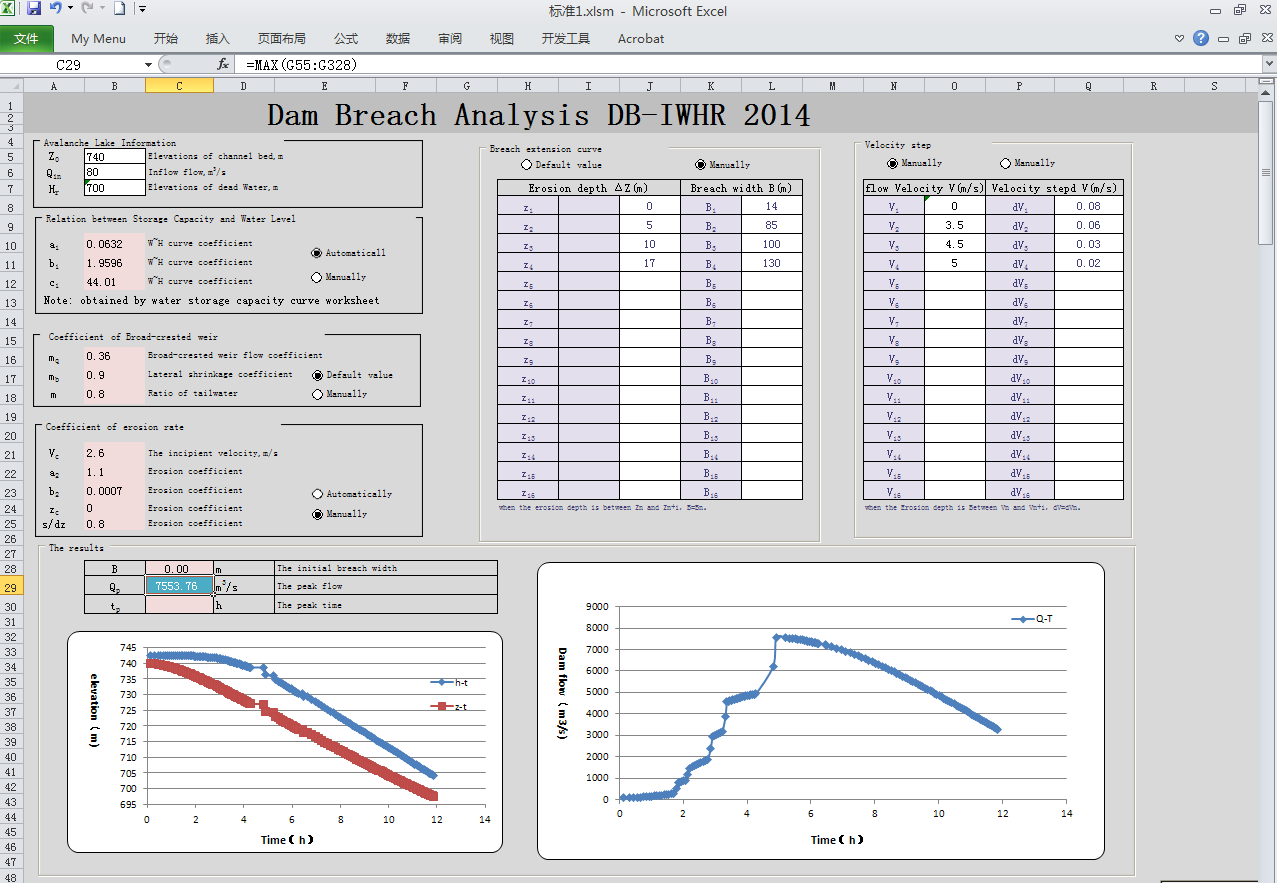
### 计算流程

计算过程中首先给定流速步长Δ*V*，然后根据已知的前一个计算过程中得到的*H*0、*z*0和*V*0，就可以进行下一步计算：

1. 根据式计算。
2. 根据式计算s。
3. 再由计算得到的和s，根据式和分别计算计算Δ*H*和Δ*t*。

以上计算过程简单明了，且没有迭代过程。然而为了使速度顺利的通过最大流速*V*m，即速度增量由正直变为负值时，需要做特殊的计算，详细的计算过程附在附录内。

### 程序界面

****

(a)

(b)

1. DB-IWHR程序界面：(a)输入区域 (b)计算区域

### 初始宽度的确定原则

单溃情况下，根据天然径流*q0*按下面步骤计算

假定溃坝起始条件为

（41）

由式可得





其中*Vc* 为起动流速。





（42）

对于唐家山情况



初始渠底高程按下式确定：

（43）

# 程序使用说明

## 数值计算实现

常规的计算方法(如：Fread, 1988; Singh, 1988a; Chang and Zhang, 2011)都是通过给定的初始时间*t*0和时间步长Δ*t*，计算相应的水位增量Δ*H*，冲刷深度Δ*z*和流速变化量Δ*V*。通过观察发现，一旦给定流速*V*，同样可以求出相应的Δ*H*、 Δ*z*和Δ*t*。因此新的算法依托MS Excel 2007 提出了一套计算简易、便于操作的新算法，即给定初始流速*V*0 和流速增量Δ*V，*计算ΔH、 Δz和Δt。

### 计算基本公式

在某一流速步*V*0 到*V*0 +Δ*V*，则平均流速为：

 (44)

水位平均高程和溃口底部平均高程：

 (45)

 (46)

根据公式（7），计算平均流速：

 (47)

其中：

 (48)

因此一旦给出Δ*V* ，即可得到*s* ：

 (49)

控制性方程（8）和（11）可以表示成如下差分格式：

 (50)  (51)

其中： 可以通过式（3）得到，式中的平均水深*h*可以通过式（6）得到。

消除方程(20) 和 (21)中的Δ*t* 和Δ*H*得：

 (52)

其中：

 (53)

 (54)

 (55)

 (56)

### 计算基本流程

计算过程中首先给定流速步长Δ*V*，然后根据已知的前一个计算过程中得到的*H*0、*z*0和*V*0，就可以进行下一步计算：

1. 根据式（47）计算。
2. 根据式（48）计算s。
3. 再由计算得到的和s，根据式(48)和 (51)分别计算计算Δ*H*和Δ*t*。

以上计算过程简单明了，且没有迭代过程。然而为了使速度顺利的通过最大流速*V*m，即速度增量由正直变为负值时，需要做特殊的计算，详细的计算过程附在附录内。

## 基本功能

溃坝洪水分析DB-IWHR表格程序的基本功能：(1) 模拟计算溃坝流量过程线及溃口发展过程线；(2) 程序计算过程中可以使用多种侵蚀率计算公式进行计算。

常规的计算方法(如：Fread, 1988; Singh, 1988a; Chang and Zhang, 2011)都是通过给定的初始时间*t*0和时间步长Δ*t*，计算相应的水位增量Δ*H*，冲刷深度Δ*z*和流速变化量Δ*V*。

溃坝洪水分析DB-IWHR表格放弃了常规的以时间为迭代步长的计算方法，采用了通过给定的初始流速*V*0 和流速增量Δ*V，*计算相应的水位增量Δ*H*，冲刷深度Δ*z*和时间变化量Δ*t*的计算方法，借用Excel界面，操作简单，无需迭代，能过方便的计算溃坝过程的流量曲线。并且提供了6种可用的侵蚀率公式：双曲线形式侵蚀率公式、指数形式侵蚀率计算公式；Meye peter- Muller 泥沙推移质公式；Englund-Hense泥沙推移质公式；Du Boys泥沙推移质公式；Eintein-Brown泥沙推移质公式，可用作比较计算。

## 用户界面

1. 程序界面介绍

挡土墙计算程序中包含以下七个表格：

1. Calculation：主界面，用于输入计算参数，以及计算方法的选择；
2. W.H curve：是Calculation 的子界面，用于回归分析得到库容参数；
3. erosion model：是Calculation 的子界面，选择侵蚀模型，填写寝室参数；
4. calculation2：溃口采用了圆弧滑裂面的扩展模式的计算页面。
5. User Manual：对整个程序的基本介绍。

Calculation表是主要的操作表，包括以下7个区域：

（1）坝体参数（包括坝高、入库流量等基本参数）

（2）宽顶堰参数（包括流量修正系数和淹没系数等）

（3）库容参数

（4）侵蚀参数（根据前述侵蚀公式和实际坝体材料送入）

（5）溃口侧壁参数（参考原理介绍）

（6）计算方法选择项

（7）推移质公式中参数（推移质公式中用到参数）

（8）计算和导出按钮

（8）

（4）

（3）

（2）

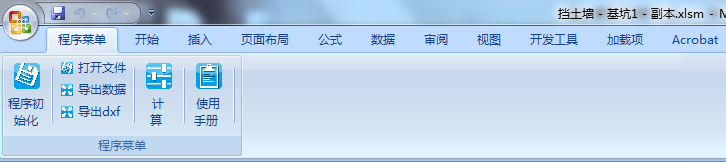
（1）

（5）

（6）

（7）

1. 基本参数输入区
2. 程序操作菜单介绍



1. 程序操作菜单

为了方便用户使用此程序，创建了一系列菜单按钮，如图10所示。这些按钮的功能如下：

（1）“程序初始化”：删除计算表格中所有基本参数数据，以便进行新算例的计算；

（2）“打开文件”：用于导入含有输入参数的xml文件；

（3）“导出数据”：将所采用的计算参数导出为xml格式的文件；

（4）“导出 Dxf”：无

（5）“计算”：参数填写或导入完毕后，可进行整体的计算；

## 程序使用前的设置和规定

基于 EXCEL2007的设置：

1. 加载规划求解

2007版的Excel加载规划求解加载宏的具体步骤如下：

（1）单击“Microsoft Office 按钮”，然后单击“Excel 选项”。

（2）如图7所示，在弹出的“Excel 选项”对话框中，单击“加载项”，然后在右侧框中选择“规划求解加载项”，然后单击“转到”。

（3）在“可用加载宏”框中，选中“分析工具库”和“规划求解加载项”复选框，然后单击“确定”，如图8所示。

加载规划求解加载宏后，“规划求解”命令将出现在“加载项”选项卡。

|  |  |
| --- | --- |
| 1. 选择规划求解加载项 | 1. 启用规划求解加载项 |

2. 宏的安全性设置

Excel2007 中可以在信任中心“Microsoft Office 按钮”——“Excel 选项”——“信任中心设置”——“宏设置”类别（图9），选择“启用所有宏”，或者“开发工具”选项卡——“代码”组——“宏安全性”按钮中更改宏的安全设置。也可以在“受信任位置”中添加电子表格挡土墙.xlsm 所在的位置。

在进行完这些设置后，每次打开挡土墙电子表时仍会在工具栏上弹出一个安全警告，如图10 所示。单击“选项”按钮，在弹出的“Microsoft 安全选项”对话框中选择“启用此内容”，然后单击确定就可以（图11）。

|  |  |
| --- | --- |
| 1. Excel2007中的宏设置 | 1. 宏被禁用的安全警告 |
| 1. 启用宏 |

3、“找不到工程或库”的处理

由于 Excel 不同版本兼容的问题，在使用中可能出现如下问题，即单击某个挡土墙电子表中创建的任一菜单按钮时，会弹出“找不到工程或库”的错误提示，如图12所示。造成这一原因在于Solver（规划求解）没有被正确引用（各个版本的Solver 所使用的语言不一致造成的）。

解决方案如下：

(1) 单击弹出窗口的“确定”按钮，程序此时处于VBA 的运行状态。

(2) 停止运行：首先在代码窗口中某行的末尾输入一个空格（输入空格的目的是为了不改变程序而快速停止运行），然后单击工具栏上的“重新设置”按钮，或者“运行”菜单上的“重新设置”命令，如图13所示。

(3) 单击“工具”菜单上的“引用”命令，在弹出的对话框中，去掉“丢失Solver”前面的复选框，如图14所示。

(4) 切换到Excel 工作表窗口，单击“数据”菜单上的“规划求解”命令，然后单击弹出的“规划求解”窗口中的“关闭”按钮。

(5) 切换回VBA 窗口，单击“工具”菜单上的“引用”命令，在弹出的对话框中会发现“丢失Solver”已经变成了“Solver”，选中前面的复选框，单击“确定”按钮。

这样 “找不到工程或库”的错误问题就可以解决了。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. 编译错误 |
|  |
| 1. 中断VBA 的运行 | 1. SOLVER丢失 |

4、方向的规定

挡土墙电子表格中坐标系的方向规定与Lossap和STAB商用程序一致，X 方向以滑动方向为正，以向右为正，也就是规定边坡剖面的滑动方向向右为正。Y 方向以重力方向为正，也即向下为正。

## 程序操作说明

1、步骤1：数据输入

数据输入可以采取两种方法：

（1）直接根据参数意义输入，这样方便修改和理解。

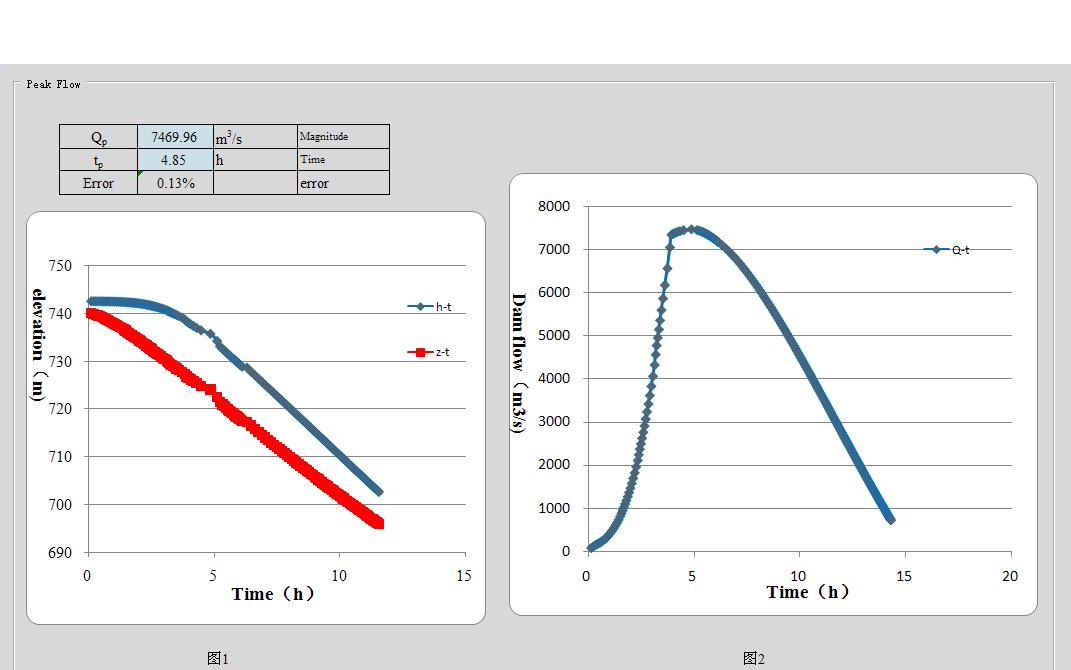
（2）采用xml文件导入，程序提供了唐家山堰塞湖的xml文件，可以根据其格式进行参数的修改，从而导入进行计算。

2、步骤2：计算结果查看

程序利用了excel强大的计算系统，可以进行自动计算，并且计算页面下方为计算结果页面图，可以方便直观的查看。程序也设置的计算结果导出按钮“export figs ”,按下按钮，就会生成一个“result”结果excel文件，文件内有流量曲线图及数据。

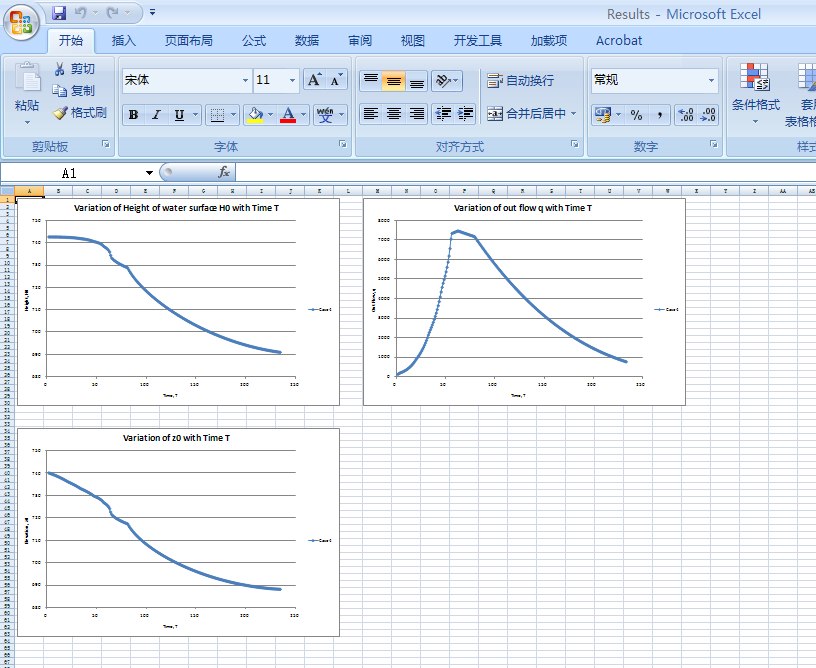
## 计算结果

按上述说明填写参数后，程序便自动给出结果图，如图所示。



1. 各滑面土压力计算信息

点击“Export Figs”按钮即可倒出结果文件“result”。



1. 计算结果显示区

# 唐家山堰塞湖溃坝实例

测试题目：与实测唐家山堰塞湖溃决过程对比。

测试目的：验证本程序计算结果可行性和准确性。

测试内容：使用了实测唐家山堰塞湖资料选取合理参数，进行数值反演，对比反演计算结果与实测数据的对比度，并分析了参数的敏感性。

## 模拟结果

根据唐家山堰塞湖实际情况以及计算原理，选取合理的数据如表4.1，图4.1给出了表格的计算曲线，反分析中预测峰值流量为7610 m3/s，实测值为6500 m3/s。

* 1. 模型输入的参数值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **参数符号及取值** | | **备注** |
| 入流量 | *q* | 80 m3/s |  |
| 初始溃口宽度 | *Bo* | 16 m | 基于泄流槽几何特征及3m水深确定 |
| 宽顶堰系数 | *C1* | 1.43 | 式（4）和（5）中的参数 |
| *C2* | 0.94 |
| *m* | 0.8 |
| 库容系数 | *p1* | 0.063 | 式（8）中的库容水位关系采用下式表示：in m3 |
| *p2* | 196.6 |
| *p3* | 44 |
| *Hr* | 700 m |
| 侵蚀率 | *Vc* | 2.7 m/s | 式(12) |
| *1/a* | 1 |
| *1/b* | 0.0005 |
| 侧向扩展 |  | | 基于表9 |



(a)



(b)



(c)



(d)



1. 计算结果与实测数据对比（a）库水位高程，（b）流量，（c）流速，（d）横截面表面宽度，（e）泄流槽底高程。◆实测数据，-计算曲线

## 敏感性分析

为了验证程序的稳定性，针对唐家山具体实例进行了敏感性分析，即每次仅改变所有影响结果参数的一个而其它不变。其计算结果流量曲线见下图4.2，表4.2列出了不同案例敏感性分析的具体参数取值以及计算结果。通过敏感性分析发现，侵蚀率系数的敏感性最大，当采用侵蚀率的最值为3.3 mm/s，三倍于实测值（1.19 mm/s）。从表4.2或图4.2中可知，案例B-2的峰值流量为13000 m3/s，接近于实测值和反分析的两倍。。

* 1. 不同案例敏感性分析特征值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | 峰值流量 | | | | 峰值流速 | |
| 达到时刻 | 水位 | 槽底高程 | 流量 | 峰值流速 | 侵蚀率 |
| *tm* | *H* | *z* | *Qm* | *Vm* | d*z/*d*t* |
| Hour | m | m | m3/s | m/s | mm/s |
| 现场测试 | | | 12:30 | 732.25 | 720.9 | 6500 | 4.96 | 1.19 |
| 回归分析 | | | 11:02 | 735.21 | 723.41 | 7609.97 | 5.78 | 1.16 |
| A | A-1 | *m*=0.67 | 10:53 | 731.42 | 719.37 | 7927.85 | 7.43 | 1.28 |
| A-2 | *m*=0.75 | 10:51 | 733.11 | 721.29 | 7832.02 | 6.48 | 1.22 |
| A-3 | *C1*=1.70 | 10:11 | 735.88 | 724.72 | 8210.78 | 6.68 | 1.24 |
| B | B-1 | *a*=1.0,*b*=0.0005 | 10:57 | 730.55 | 717.06 | 9475.62 | 6.18 | 1.58 |
| B-2 | *a*=0.9,*b*=0.0003 | 10:26 | 724.61 | 707.10 | 13524.99 | 7.05 | 2.54 |
| D | C-1 | Table 4 | 13:26 | 727.36 | 712.54 | 6740.95 | 6.48 | 1.20 |



(a)



(b)



(c)

1. 敏感性结果分析（a）案例A,（b）案例B,（c）案例C

# 参考文献

1. 武汉水利水电学院河流泥沙工程学教研室编著，《河流泥沙工程学》（上册）。水利电力出版社，1983年11月.
2. 韩其为，著，《水库淤积》。科学出版社，2003年.
3. 王崇浩，韩其为，等，向家坝和溪洛渡水库下游河床冲淤变形一维数学模型计算与分析。中国水利水电科学研究院，1997年1月.
4. 吴持恭，主编，《水力学》（上册，第二版）。高等教育出版社，1996年4月.
5. Annandale, G. W. (2006). “*Scour Technology: Mechanics and Engineering Practice.*” McGraw-Hill, New York, p430.
6. Briaud, J. L. (2008). “Case histories in soil and rock erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River, Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng*., 134(10), 1425–1447.
7. Bishop, A. W. (1955). “The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.” *J. Geotechnique, 5(1), 7-17.*
8. Chang, D. S., & Zhang, L. M. (2010). “Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth.” *Nat Hazards Earth Syst Sci, 10(4), 933-946.*
9. Chen, Z. Y. & Wang, X. G. (2000). “Chaper12: Rock slope engineering.” *Large Dams in China, Pan, J. Z. & He, J.*eds, China Hydropower Press, China, 695-721.
10. Chen, Z. Y., & Shao, C. M. (1988). “Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis.” *Canadian Geotechnical Journal, 25(4), 735-748.*
11. Cristofano, E. A. (1965). “Method of computing erosion rate of failure of earth dams.” U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
12. Fread, D. L. (1984a). “DAMBRK: The NWS dam break flood forecasting model.” National Weather Service(NWS) Report, NOAA, Silver Spring, MA.
13. Fread, D. L. (1988). “BREACH: An erosion model for earthen dam failures (Model description and user manual).”National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Spring, MD.
14. Gaucher, J., Marche, C., & Mahdi, T. F. (2010). “Experimental investigation of the hydraulic erosion of noncohesive compacted soils.” *J. Hydraul. Eng.*, 136(11), 901-913.
15. Lowe, III, J., & Karafiath (1959). “Stability of earth dam upon drawdown.” First Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City.
16. Liu, N., Chen, Z., Zhang, J., Lin, W., Chen, W., & Xu, W. (2010). “Draining the Tangjiashan barrier lake.” *J. Hydraul. Eng.*, 136(11), 914-923.
17. Singh, V. P., Scarlatos, P. D., Collins, J. G., & Jourdan, M. R. (1988). “Breach erosion of earth-fill dams (BEED) model.” *Natural Hazards*, 1(2), 161-180.
18. Wahl, T. L. (1998). “Prediction of embankment dam breach parameters—A literature review and needs assessment.” *Dam Safety Research Report DSO-98-004,* U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, July.
19. Wu, W. M. (2013). “Simplified physically based model of earthen embankment breaching.” *J. Hydraul. Eng* 139(8), 837-851.
20. Zhang, J., Li, Y., Xuan, G., Wang, X., & Li, J. (2009). “Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength.” *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(10), 3024-3029.