

2 开发背景

在国家“十二五”期间，在科技支撑项目“重大水利工程建设信息化标准化专项技术开发研究”的资助下，研发重力坝深层抗滑稳定性分析程序。该程序是在 Excel 界面上，利用其强大的计算功能并结合 VBA 二次开发，研制的计算重力坝深层抗滑稳定分析程序。该程序计算原理为由 Donald 和 Chen 在“Slope stability analysis by an upper bound plasticity method”一文中提出的塑性力学上限解法--Sarma 法。

3 基础理论和规范、文献依据

3.1 重力坝深层抗滑稳定基本原理

基于等安全系数法（即 Sarma 法）的解法虽然并不复杂，但无论从其表达式还是求解步骤方面，都比较冗长繁琐。Donald 和 Chen^[1] 对 Sarma 法从理论背景到解题方法方面作出了一系列的改进。同时将 Sarma 法纳入塑形力学上限定理的理论框架中，本文正式基于塑性力学上限定理研制开发的 SARMA.XLS 法。现将其计算方法以岩质边坡为例进行说明。

将某一边坡的塑性区离散为一系列具有倾斜界面的条块，如图 1。每一块都视为刚体，其变形速率为 V ，与该楔体底线夹角为 ϕ_e ，该楔体与右边相邻块体的相对速度为 V_j ，此相对速度与该两块体的交界面的夹角为 ϕ_e^j 。内能耗散发生于该条块的底面和条块间的界面，在条块内为零。若滑坡体被分成 n 个条块，因而有 $n-1$ 个界面。功能平衡表达式如下，

$$\sum_{i=1}^{n-1} D_{ie}^j + \sum_{i=1}^n \Delta D_{ie} = WV^* \quad (1)$$

上式左边的第一和第二项分别为沿条间界面底滑面的内能耗散，下标‘e’表示相应的强度参数隐含了安全系数 F 。

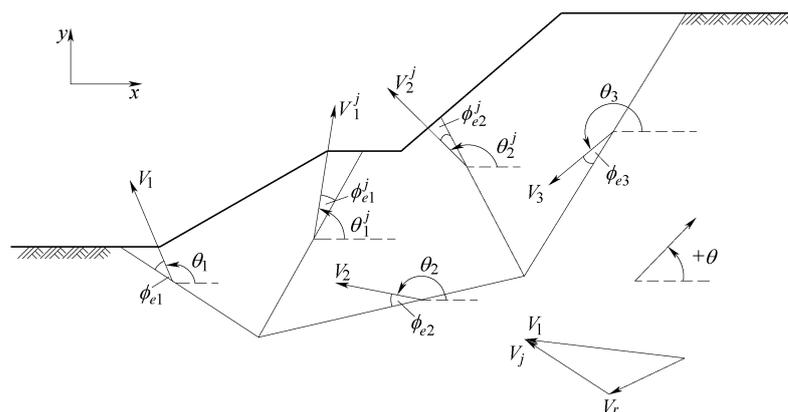


图 3. 能量法计算简图

第 k 个界面右边条块的速度都可以表示成第一个条块的速度 V_1 的函数。

$$V_k = \kappa V_1 \quad (2)$$

其中

$$\kappa = \prod_{i=1}^k \frac{\sin(\alpha_i^l - \phi_{ei}^l - \theta_i^j)}{\sin(\alpha_i^r - \phi_{ei}^r - \theta_i^j)} \quad (3)$$

式中上标 l 和 r 代表界面左和右的物理量， j 代表界面上的物理量。 θ_l 、 θ_r 和 θ_j 分别为左边条块、右边条块和条块界面速度与 x 轴的夹角，均定义为从 x 正方向开始反时针旋转为正，计算从第一个界面开始，到分割第 k 和第 $k+1$ 个块体的界面终止。

滑裂面上的内能耗散由下式确定，

$$D_e = (c_e \cos \phi_e - u \sin \phi_e) \sec \alpha V \Delta x \quad (4)$$

可得计算安全系数的计算公式如下：

$$\sum_{i=1}^n \kappa [(c_e \cos \phi_e - u \sin \phi_e) \sec \alpha \Delta x - (\Delta W + T_y) \sin(\alpha - \phi_e) - (\eta' \Delta W + T_x) \cos(\alpha - \phi_e)]_i - \sum_{i=1}^{n-1} \kappa (c_e^j \cos \phi_e^j - u^j \sin \phi_e^j)_i \csc(\alpha^r - \phi_e^r - \theta_j)_i \sin(\Delta \alpha - \Delta \phi_e)_i L_i = 0 \quad (5)$$

上式中仅包含一个未知量，即隐含于 c_e 和 $\tan \phi_e$ 中的安全系数 F ，可通过迭代求解。

3.2 文献、规范依据

3.2.1 文献

- [1] Donald, I. and Chen, Z. Slope stability analysis by an upper bound plasticity method. Canadian Geotechnical Journal, 1997. 34(11): 853-862
- [2] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 贾志欣, 王玉杰. 土质边坡稳定分析—原理、方法、程序. 中国水利水电出版社. 2003
- [3] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 贾志欣, 王玉杰. 岩质边坡稳定分析—原理、方法、程序. 中国水利水电出版社. 2005

3.2.2 规范

- [1] 中华人民共和国电力行业标准. DL5108-1999 混凝土重力坝设计规范, 上海, 上海科学普及出版社, 2000.
- [2] 中华人民共和国行业标准. SL319-2005 混凝土重力坝设计规范, 北京, 中国水利水电出版社, 2005.

4 程序实现

本程序信息输入部分分为两部分，第一部分是重力坝几何信息和物理参数信息（包括重度、强度指标等），第二部分是外部荷载信息。几何信息输入包括重力坝的形状及深层软弱滑面其输入过程主要包括三种，分别由 cad 导出读取数据、stab 导出读取数据及本程序导出数据。

物理参数输入如图 2。

材料总数	13						
编号	内摩擦角 ϕ	粘聚力 c	ϕ_1	c_1	干容重 r_d	饱和容重 r_{sat}	孔隙水压力 r_u
1	0	0	0	0	0	0	0
2	56.31	2000	0	0	24	24	0
3	46.34	1100	0	0	26	26	0
4	42.92	900	0	0	26	26	0
5	38.66	700	0	0	26	26	0
6	21.8	200	0	0	26	26	0
7	26.57	300	0	0	26	26	0
8	19.29	100	0	0	26	26	0
9	46.38	1100	0	0	26	26	0
10	0	0	0	0	10	10	0
11	47.73	1100	0	0	26	26	0
12	45	900	0	0	26	26	0
13	26.57	200	0	0	26	26	0

图 4. 材料参数输入

荷载输入主要包括集中力荷载输入、均布力荷载输入及地震荷载输入。其输入过程为直接在表格对应输入区输入，如图 3、4、5。

集中荷载输入区				
集中力总数	4			
编号	P_x	P_y	x	y
1	-2163.2	0	-20.98	140
2	0	23556	-180	134.19
3	8068	0	-153	133.97
4	96040	0	-216	70

图 5. 集中荷载输入区

5 程序测试报告

5.1 测试目的

为使该程序更好地为科研、生产和实际工程服务，对该版本程序计算结果的准确性、使用功能的合理性、程序的实用性、程序的稳定性等方面进行测试是十分必要的，也是程序开发过程的一个重要环节。

5.2 测试内容

这是一个三角形重力坝的例子（如图 7），对该程序的精确程度及收敛进行测试。其主要参数值：上游水头为 H ， $m=0.7$ ，坝高 $h=100$ ，扬压力上游侧为 $H_s = aH$ ，其中 $a=0.3$ ，坝体材料饱和，干重度 $\gamma = 2.4$ ，水重度 $\gamma_w = 1$ 。摩擦角 $\phi = 60.94^\circ$ ，粘聚力 $c=150$ 。计算结果参见表 1。

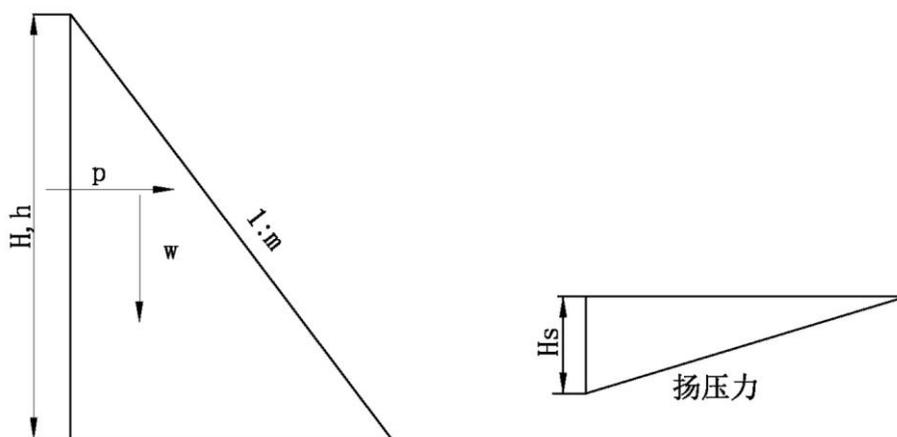


图 9. 三角形重力坝断面示意图

表 1 三角形重力坝测试对比

水头 H	理论值	Excel	数据文件
H=120	3.243	3.253	Sarma_outH=120.dat
H=115	3.546	3.548	Sarma_outH=115.dat
H=110	3.892	3.895	Sarma_outH=110.dat
H=105	4.288	4.287	Sarma_outH=105.dat

5.3 结论

由三角形重力坝测试对比可以得出，本程序计算准确程序具有较好的稳定性，可以应用于科研、教学、工程生产等工作中。

6 工程应用报告

向家坝水利枢纽由混凝土重力坝、右岸地下厂房及左岸坝后厂房、通航建筑物和两岸灌溉取水口组成。常态混凝土重力坝坝顶高程 383 米，最大坝高 161 米，坝顶长度 909.3 米。坝址位于峡谷河段出口，金沙江由西向东流经坝址，河谷开阔。坝址地层出露主要为三迭系上统须家河组，可分为四大岩组 ($T_3^1 \sim T_3^4$)。工程的常态混凝土重力坝座落在岩性条件较好的中厚层~厚层 $T_3^{2-4} \sim T_3^{2-6}$ 砂岩上，坝基持力条件较好。

本程序结合向家坝重力坝泄 6 坝段的三种滑移模式进行计算验证：

(1)滑移模式一：在上游水平荷载作用下，以坝基面为主滑面，下游基岩抗力体缓倾上游的结构面和岩桥的组合作为剪出面。如图 7 所示。

(2)滑移模式二：在上游水平荷载作用下，首先沿坝基面滑动，然后以倾向下游的一级软弱结构面 T_3^{2-3} 的顶面或底面破碎夹泥层为主滑面，下游基岩抗力体缓倾上游的结构面和岩桥的组合作为剪出面。如图 8 所示。

(3)滑移模式三：在上游水平荷载作用下，首先沿坝基面滑动，然后以倾向下游的一级软弱结构面 T_3^{2-5} 的顶面或底面破碎夹泥层为主滑面，下游基岩抗力体缓倾上游的结构面和岩桥的组合作为剪出面。如图 9 所示。

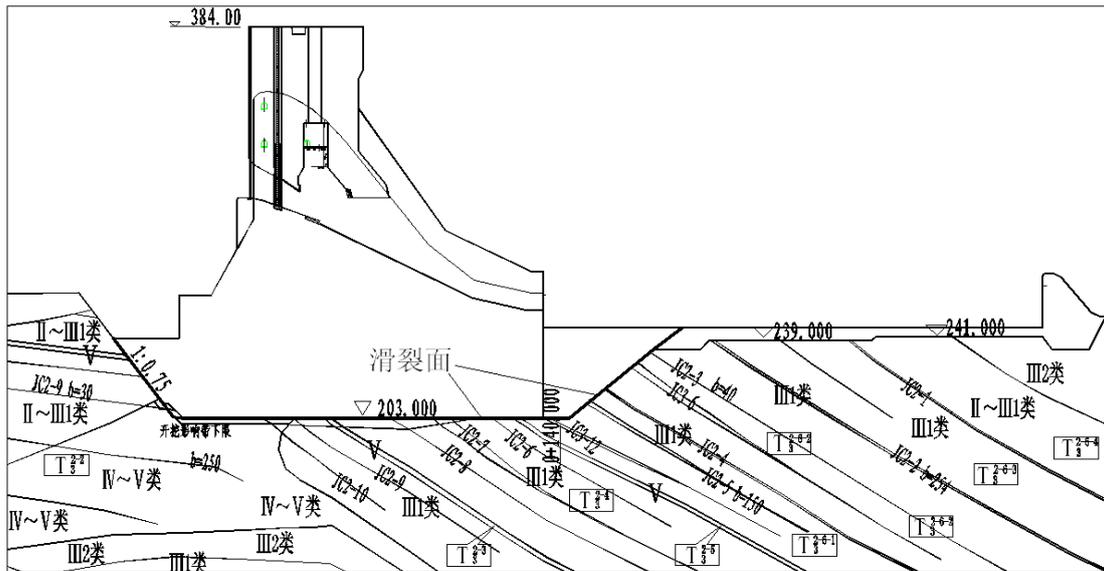


图 10. 泄 6 滑移模式一

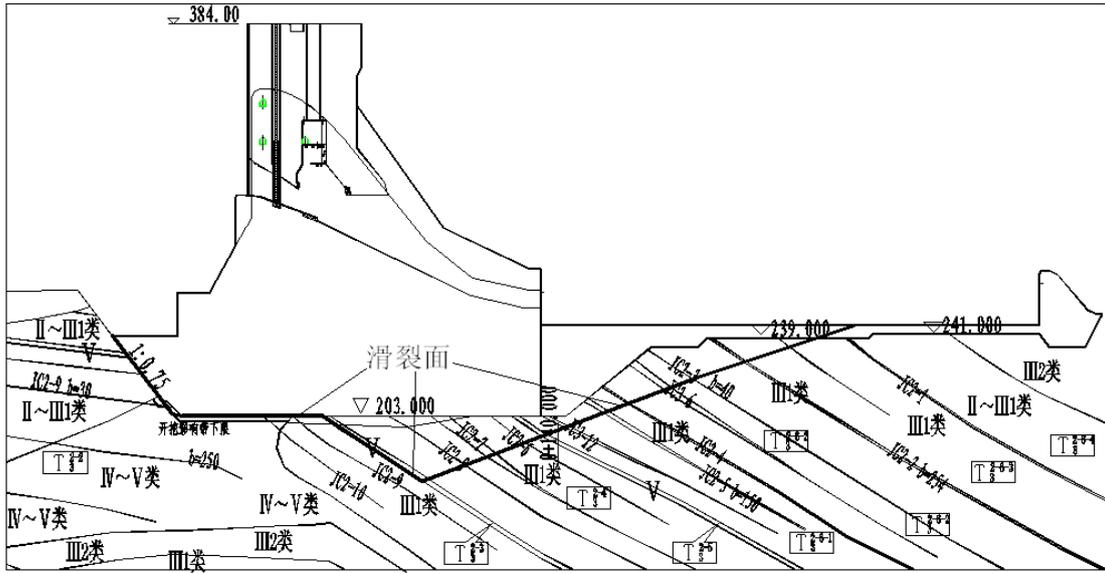


图 11. 泄 6 滑移模式二

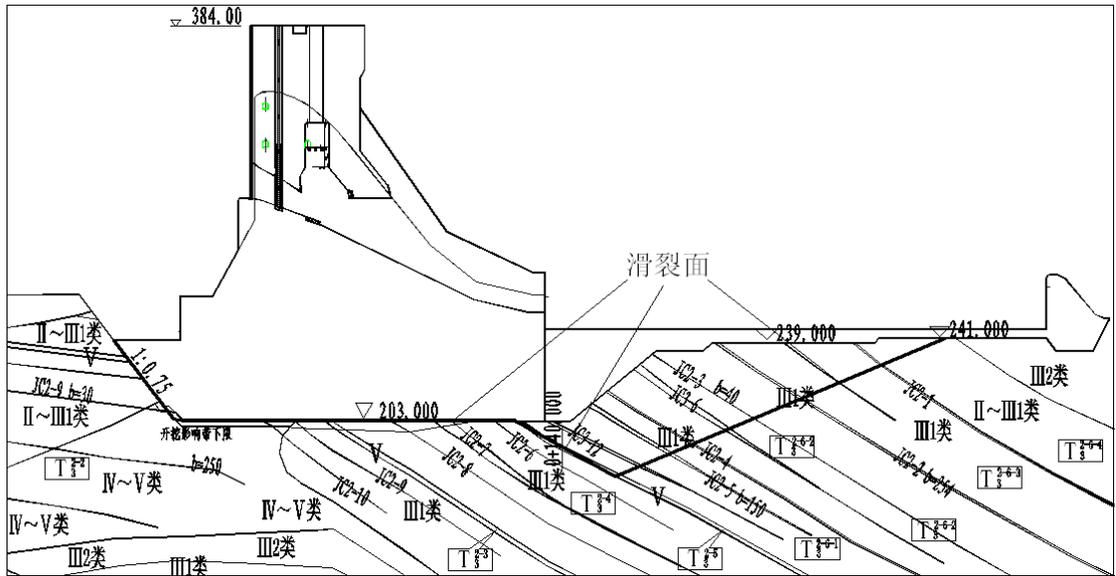


图 12. 泄 6 滑移模式三

6.1 测试结果

表 2 向家坝测试结果比对

工程编号	emu	excel	误差	数据文件
Lxs6-11	4.386	4.354	0.7%	Lxs6-11.dat
Lxs6-12	5.160	5.118	0.8%	Lxs6-12.dat
Lxs6-13	5.149	5.246	1.8%	Lxs6-13.dat
Lxs6-14	3.193	3.217	0.7%	Lxs6-14.dat
Lxs6-15	3.997	3.969	0.7%	Lxs6-15.dat
Lxs6-21	3.840	3.837	0	Lxs6-21.dat

Lxs6-22	4.931	4.926	0.1%	Lxs6-22.dat
Lxs6-23	4.989	5.084	1.9%	Lxs6-23.dat
Lxs6-24(chu)	3.004	2.982	0.7%	Lxs6-24.dat
Lxs6-25(chu)	3.642	3.483	4.3%	Lxs6-25.dat
Lxs6-31(chu)	5.661	5.441	3.9%	Lxs6-31.dat
Lxs6-32(chu)	6.796	6.512	4.1%	Lxs6-32.dat
Lxs6-33	6.801	6.726	1.1%	Lxs6-33.dat
Lxs6-34	3.768	3.709	1.5%	Lxs6-34.dat
Lxs6-35	5.066	4.895	3.3%	Lxs6-35.dat

6.2 测试结论

本程序通过在向家坝实际工程应用中与 emu 程序计算程序对比，大部分误差都在 1% 左右，本程序的精度得以验证。可以应用于教学，科研及实际工程。