

# Sarma 法在坝基深层稳定问题中的应用

王静<sup>1</sup>， 朱银帮， 张国新

**摘要：**坝基及坝体系统的整体深层稳定问题关系重大，常有超出规范模型的情况存在。本文针对第二破裂面位于坝基内部或滑动路径复杂多变的情况，利用 Sarma 法，引入一个假想体积力使系统处于极限平衡状态，从而根据力的平衡原理建立方程组，求得一个能与规范安全系数相匹配的安全系数。

**关键字：**深层抗滑稳定 第二破裂面 Sarma 法 极限平衡状态 临界加速度

## 1 引言

重力坝的深层抗滑稳定问题在已建或在建工程中具有一定普遍性，重力坝规范<sup>[6]</sup>中给出了简单双滑面的计算方法。但工程中经常遇到复杂的多滑面或难以简化成简单双滑面的情况，需要对稳定进行专门论证。不少学者做过大量的研究工作，但由于问题本身的复杂性，至今仍没有一套成熟的计算和评价方法，仍需进行深入研究。为此，在国家‘十一五’科技支撑计划中专门列入一个课题对该问题进行研究[十一五申请指南]，引起国内众多学者的关注。

目前为止，关于复杂滑裂面深层抗滑稳定方面的计算方法或评价标准的探讨文章众多<sup>[1]-[5]</sup>，虽争论颇多，但刚体极限平衡法因其概念清晰明确，目前已积累了大量的工程实践经验，有相对成熟的评价标准，便于操作，故在实际工程应用中，坝体深层抗滑稳定性的评价多以刚体极限平衡法计算成果为整体稳定性评价的依据。非线性有限元法可以通过降强或超载的方式，通过模拟沿滑裂面的渐进破坏求解安全系数，但是由于有限元计算成果受剖分密度、网格形式、计算方法、计算程序等的影响较大，从而使有限元计算成果难以形成一个统一的安全衡量标准，所以具体应用中有限元计算成果多用于辅助评价。

现行规范 SL319-2005、DL 5108—1999 及相关文献中关于刚体极限平衡法的分析讨论多是基于图 1 所示的标准模型，其适用性局限于第二破裂面（BD 面）位于坝趾或坝趾下游侧的情况。但是在实际工程中，经常遇到多滑面或第二破裂面位于坝基内部的情况，此时规范方法不再适用。Sarma 法<sup>[5]</sup>同样是一种基于极限平衡理论的分析方法，自 1979 年由 Sarma 先生提出后，在边坡稳定性分析评价中得到了广泛应用<sup>[8][9]</sup>。该方法根据滑裂面的形式将分析对象划分成条块，对各条块根据刚体极限平衡原理建立静力平衡方程求解。Sarma 法力学模型相对严密，考虑了侧滑面上的作用力，其滑裂面可以是任意折线；且对条块形状没有特殊要求，既可采用直条分，亦可根据实际工程地质情况采用斜条分的形式。由于其本质仍是块体极限平衡原理，满足静力平衡条件及 Mohr-Coulomb 破坏准则，所以其计算成果可直接与规范安全系数接轨，可为工程设计提供直观的判断依据。本文用 Sarma 法分析武都 RCC 重力坝深层抗滑稳定分析，并对不同算法的结果进行了比较。

- 
- 基金项目：自然科学基金重点基金 E50539120、50539010。“十一五”国家科技支撑计划重大项目：南水北调工程若干关键技术研究与应用
  - 作者简介：王静，女，高级工程师，四川省水利水电勘测设计院，西部之光学者

## 2 Sarma 法用于深层抗滑稳定的计算原理

Sarma 法对各块体施加一个假想的水平体积力  $K_c W_i$ ，假定在该体积力作用下，将条块底滑面及侧滑面的强度指标同步降低  $K$  倍，直至所研究的整个深层滑动系统（坝体及基岩整体）处于极限平衡状态（即给每个滑动块体施加一个临界加速度  $K_c$ ），继而根据力的平衡原理及 Mohr-Coulomb 准则建立方程组，得到对应安全系数  $K$ 。

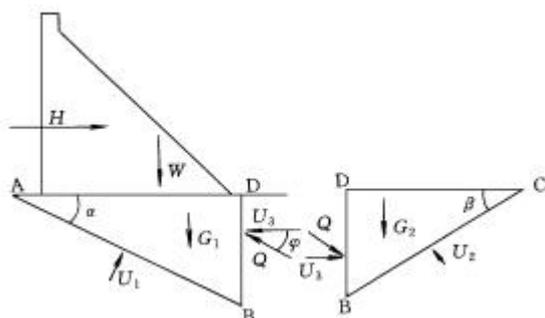


图 1 规范标准模型

若坝基岩体内发育有陡斜倾角的层间错动带或其他类型的软弱结构面，则进行条分时采取斜条分形式更合理。现根据 Sarma 法基本原理推导三滑面时的计算公式，为使其更具有普遍性，采用斜条分进行公式的推导（见图 2）：

设在临界加速度系数  $K_c$  条件下的抗滑稳定安全系数为  $K$ ，当强度指标  $c$  和  $\phi$  缩小为  $c'_e = \frac{c}{K}$  和  $\tan \phi'_e = \frac{\tan \phi}{K}$  时滑动体处于极限平衡状态。在以下的叙述中，凡带有下标“e”者，意味该物理量包含的  $c$  和  $\phi$  均已经被安全系数同步折减，形式如下：

$$\text{底滑面 AB、BC、CD: } c'_{1e} = \frac{c'_1}{K}, \phi'_{1e} = \arctan \left[ \frac{\tan(\phi'_1)}{K} \right], c'_{2e} = \frac{c'_2}{K}, \phi'_{2e} = \arctan \left[ \frac{\tan(\phi'_2)}{K} \right],$$

$$c'_{3e} = \frac{c'_3}{K}, \phi'_{3e} = \arctan \left[ \frac{\tan(\phi'_3)}{K} \right]$$

$$\text{侧滑面 BE、CF: } c'_{c1e} = \frac{c'_{c1}}{K}, \phi'_{c1e} = \arctan \left[ \frac{\tan(\phi'_{c1})}{K} \right], c'_{c2e} = \frac{c'_{c2}}{K}, \phi'_{c2e} = \arctan \left[ \frac{\tan(\phi'_{c2})}{K} \right]$$

考虑块体①的稳定，根据  $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$  建立力平衡方程，则有：

$$P_1 + N_1 \sin \alpha_1 + U_1 \sin \alpha_1 - T_1 \cos \alpha_1 - E_1 \cos \gamma_1 - U_{c1} \cos \gamma_1 - X_1 \sin \gamma_1 - K_c W_1 = 0$$

$$W_1 + E_1 \sin \gamma_1 + U_{c1} \sin \gamma_1 - X_1 \cos \gamma_1 - N_1 \cos \alpha_1 - U_1 \cos \alpha_1 - T_1 \sin \alpha_1 = 0$$

考虑块体②的稳定，根据  $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$  建立力平衡方程，则有：

$$E_1 \cos \gamma_1 + U_{c1} \cos \gamma_1 + X_1 \sin \gamma_1 - T_2 \cos \alpha_2 - N_2 \sin \alpha_2 - U_2 \sin \alpha_2 - E_2 \cos \gamma_2 - U_{c2} \cos \gamma_2 - X_2 \sin \gamma_2 - P_2 - K_c W_2 = 0 \quad (3)$$

$$-E_1 \sin \gamma_1 - U_{c1} \sin \gamma_1 + X_1 \cos \gamma_1 + T_2 \sin \alpha_2 - N_2 \cos \alpha_2 - U_2 \cos \alpha_2 + E_2 \sin \gamma_2 + U_{c2} \sin \gamma_2 - X_2 \cos \gamma_2 + W_2 = 0 \quad (4)$$

考虑块体③的稳定，根据  $\sum F_x = 0$ ， $\sum F_y = 0$  建立力平衡方程，则有：

$$E_2 \cos \gamma_2 + U_{c2} \cos \gamma_2 + X_2 \sin \gamma_2 - T_3 \cos \alpha_3 - N_3 \sin \alpha_3 - U_3 \sin \alpha_3 - K_c W_3 = 0 \quad (5)$$

$$-E_2 \sin \gamma_2 - U_{c2} \sin \gamma_2 + X_2 \cos \gamma_2 + T_3 \sin \alpha_3 - N_3 \cos \alpha_3 - U_3 \cos \alpha_3 + W_p + W_3 = 0 \quad (6)$$

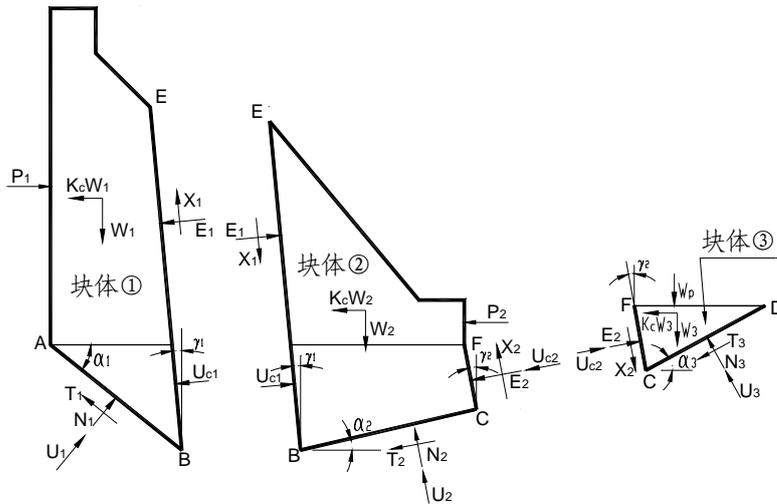


图 2 三滑面模式 Sarma 法力学模型

采用 Mohr-Coulomb 准则建立结构面强度破坏条件：

对于底滑面 AB、BC、CD 分别有

$$T_1 = N_1 \tan(\varphi'_{1e}) + c'_{1e} A_1 \quad (7)$$

$$T_2 = N_2 \tan(\varphi'_{2e}) + c'_{2e} A_2 \quad (8)$$

$$T_3 = N_3 \tan(\varphi'_{3e}) + c'_{3e} A_3 \quad (9)$$

对于侧滑面分别有

$$X_1 = E_1 \tan(\varphi'_{c1e}) + c'_{c1e} A_{c1} \quad (10)$$

$$X_2 = E_2 \tan(\varphi'_{c2e}) + c'_{c2e} A_{c2} \quad (11)$$

模型及式中各物理量的含义如下：

$P_1$ 、 $P_2$ ——分别为作用于坝体上游坝面、下游坝面的的所有水平力之和，kN；

$N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ ——分别为作用于底滑面 AB、BC、CD 上的正压力，kN；

$U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ ——分别为作用于底滑面 AB、BC、CD 上的扬压力，kN；

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ ——分别为作用于底滑面 AB、BC、CD 上的剪力，kN；

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ——分别为底滑面 AB、BC、CD 与水平面的夹角，(°)；

$U_{c1}$ 、 $U_{c2}$ ——分别为作用于 BE、CF 面上的扬压力，kN；

$E_1$ 、 $E_2$ ——分别为作用于 BE、CF 面上的法向力，kN；

$X_1$ 、 $X_2$ ——分别为作用于 BE、CF 面上的切向力，kN；

$W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ ——分别为块体①、②、③部分的坝体及地基的总自重，kN；

$K_c$ ——临界加速度系数，kN；

$W_p$ ——作用与块体③上的总竖向外力；kN；

以上建立 11 个方程式，其中包含了  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $X_1$ 、 $X_2$  这十个未知量，同时也包含安全系数  $K$ ，它隐含于强度指标  $\varphi'_e$ 、 $c'_e$  中，总计为十一个未知量。先假设一系列的  $K$  值，根据  $c'_{ie} = \frac{c'_i}{K}$  和  $\tan \varphi'_{ie} = \frac{\tan \varphi'_i}{K}$  联立十一个方程组，通过迭代即可求得对应临界加速度  $K_c$

及其他所有未知量。作安全系数  $K$  与临界加速度  $K_c$  的关系曲线(如图 3 所示，单调递减关系)，即可得到与  $K_c$  对应的安全系数。当  $K_c = 0$  对应  $K$  值即为无地震力作用下的安全系数；当  $K_c$  等于地震加速度时对应  $K$  值为地震力作用下的抗滑稳定安全系数。

同样，根据以上所示 sarma 法的基本原理，可以进行多滑裂面的计算，对于  $n$  个块体，有  $4n-1$  个未知量：分别为  $n$  个底滑面上的法向力  $N$ ， $n$  个切向  $T$ ； $n-1$  个侧滑面上的法向力  $E$ ， $n-1$  个切向力  $X$ ；一个未知安全系数  $K$  或临界加速度  $K_c$ 。同时有  $4n-1$  个方程，分别为底滑面静力平衡方程  $2n$  个；根据 Mohr-Coulomb 准则建立的法向力与切向力的关系式底滑面  $n$  个，侧滑面  $n-1$  个。具体求解方式与三滑面情况类似。

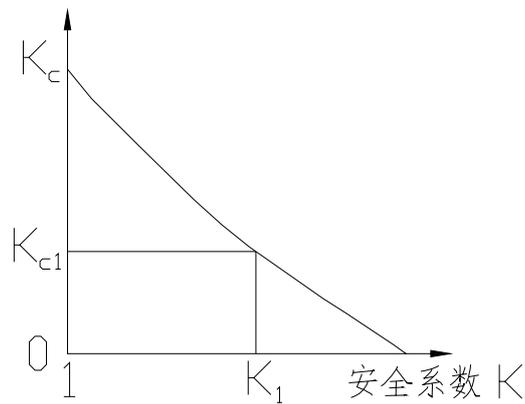


图3 安全系数  $K$  和临界加速度  $K_c$  的关系曲线

### 3 Sarma 法在武都重力坝深层抗滑分析中的应用

武都水库工程坝址区位于龙门山褶断带前山构造带的北段，为泥盆系中统白石铺群观雾山组可溶岩地层，处于 F5 与 F7 断层之间，区内主要构造线呈 NE~SW 向展布，岩层总体产状  $N41^\circ \sim 68^\circ E/NW \angle 66^\circ \sim 78^\circ$ 。河床高坝段坝基内断层破碎带和层间错动带等软弱结构面发育，地质条件十分复杂。成组缓倾下游的裂隙、断层等软弱结构面与成组缓倾上游的断层、裂隙相互切割，构成多组滑动边界，如图 4 所示。缓倾上、下游的软弱结构面交点多位于坝基，从中选取强度指标最低的一组典型断层组合（断层 10f2—f115）为例进行分析，如图 3 所示，其第二破裂面位于坝基内部，穿过坝体。

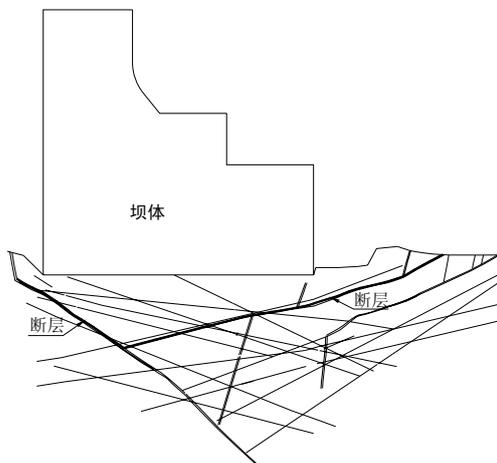


图4 武都水库典型坝段地质剖面图

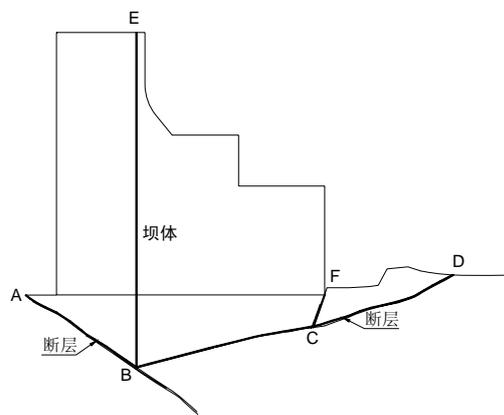


图5 典型组合断层 10f2-f115

武都水库工程 18#坝段的深层抗滑稳定问题最具代表性，典型组合为断层 10f2—f115，缓倾下游的断层 10f2 与缓倾上游的断层 f115 在坝基内部相交，成为深层滑动的边界，所形成的滑动楔体最大埋深 30m (B 点)，如图 5 所示。

断层 10f2 顺河方向发育，自坝轴线上游 20m 到坝轴线下游 90m，产状为  $N40 \sim 60^\circ E/SE \angle 45 \sim 50^\circ$ ，倾向下游偏左岸，与坝轴线交角  $18 \sim 38^\circ$ 。由断层角砾岩、岩屑夹泥及破碎岩块等组成，破

碎带厚 0.1~0.65m, 岩屑岩块含泥厚 0.1~0.4m, 角砾岩厚 0.09~0.30m。

断层 f115 产状 N15~35° E / NW ∠22~25°, 倾向上游偏右岸, 向下游逐渐出露于地表。断层破碎带在高程 545m 以上, 受风化溶蚀作用, 总体上为泥夹岩屑, 抗剪断强度指标为  $f' = 0.35$ 、 $c' = 0.03MPa$ ; 545m 高程以下则为岩屑夹泥型, 抗剪断强度指标为  $f' = 0.45$ 、 $c' = 0.06MPa$ 。

利用本文所述 Sarma 法对断层 10f2-f115 组合进行计算, 计算成果见表 1。同时利用以下方法对其进行深层稳定复核: ①基于材料力学的刚体极限平衡法 (将建基面上正应力简化为直线分布, 剪应力简化为均匀分布, 移开坝体研究基础稳定); ②基于有限元的刚体极限平衡法 (利用文献<sup>[3]</sup>中的方法, 根据有限元计算获得建基面上的应力分布, 继而移开坝体研究基础的稳定)。上述三种方法计算成果对比见表 1。

表 1

计算工况	Sarma		基于材料力学的刚体极限平衡法		基于有限元的刚体极限平衡法		规范要求安全系数
	未处理	处理后	未处理	处理后	未处理	处理后	
正常蓄水位	1.39	3.06	1.45	3.0	1.80	3.90	3.0
设计洪水位	1.43	3.18	1.49	3.0	1.89	4.11	3.0
校核洪水位	1.38	3.07	1.46	2.5	1.84	4.02	2.5
正常蓄水位 +8 度地震	1.11	2.41	1.21	2.3	1.49	3.18	2.3

断层 10f2、f115 分别缓倾上下游, 切割组成的滑动楔体埋深较浅, 断层多含泥, 抗剪断指标低, 特别是粘结强度  $c'$  非常低, 导致该坝段深层抗滑稳定安全系数很小, 难以满足规范<sup>[6]</sup>要求。故需对坝基进行加固处理, 设计采用坝基上下游侧均开挖大齿槽, 置换为混凝土的方案, 加固处理后该坝段深层抗滑稳定性满足规范<sup>[6]</sup>要求。

同时, 该工程亦进行了地质力学模型试验, 基本结论如下: 地基未处理时采用超载破坏试验法, 当超载系数为 1.6 时发生初裂, 超载安全度为 2.2; 经置换处理后, 采用以超载为主、强降为辅的方法进行破坏试验, 断层的抗剪断强度降低 15%~20%, 再超载至 3.0 P0~4.0P0 时, 变位幅度明显增大, 出现破坏失稳趋势。综合稳定安全度  $Kc = 3.6 \sim 4.8$ 。

经地质力学模型试验成果及有限元成果综合评价可知: Sarma 法计算成果与地质力学模型试验结论、基于材料力学的刚体极限平衡法、基于有限元的刚体极限平衡法在规律上及工程定性上有良好的一致性, 成果略偏安全, 可作为对深层抗滑稳定问题进行定性和定量评价、制定处理方案的依据。

#### 4 结语

本文针对第二破裂面位于坝基内部或滑动路径复杂多变的情况, 提出利用 sarma 法, 引入一个假想体积力使系统处于极限平衡状态, 从而根据力的平衡原理建立方程组, 求得一个能与规范安全系数相匹配的安全系数。综合本文研究成果, 所得结论如下:

(1) Sarma 法的本质是利用块体极限平衡法, 计算成果可直接与规范安全系数接轨, 可为工程设计提供非常直观的判断依据。

(2) Sarma 法考虑了侧滑面上的作用力, 其滑裂面可以是任意折线, 条块划分可根据地质情况选择直条分或斜条分, 且适用于第二破裂面处于不同位置的情况, 从而可以对各种特殊边界条件下的计算模型进行分析计算。

(3) Sarma 法计算成果与有限元成果及地质力学模型试验成果在工程规律即定性评价上有良好的一致性, 与其他两种方法成果相比成果略偏安全, 可作为对深层抗滑稳定问题进行定性和定量评价、制定处理方案的依据。

参考文献:

- [1]. [1] 潘家铮.重力坝设计.北京.水利电力出版社.1987.
- [2]. [2] 张津生,《浅析刚体极限平衡法——探讨重力坝深层抗滑稳定的安全判据》, 水力发电学报, 2005, 24(5).
- [3]. [3] 张国新, 刘毅,《坝基稳定分析的有限元直接反力法》, 水力发电, 2007, (1).
- [4]. [4] 陈祖煜等, 对重力坝设计规范中双斜面抗滑稳定分析公式的讨论意见.水利发电学报, 2002, (2)
- [5]. [5] 黄东军, 聂广明. 重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考, 水利发电学报, 2005, 24(2): 90-94.
- [6]. [6] 中华人民共和国水利行业标准, 混凝土重力坝设计规范 SL319-2005. 中华人民共和国水利部.
- [7]. [7] Sarma, S.K.Stability analysis of embankments and slopes[J]. Geotechnique.1973,(23):423-433
- [8]. [8] 边坡稳定性分析的 sarma 模式及其可靠度计算方法.水力学报, 37(4): 457-463, 2006
- [9]. [9] 张强勇, 刘大文, 蔡德文. Sarma 法在加锚岩质高边坡安全稳定性评价分析中的应用. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3368-3372.