

库区边坡稳定性计算的改进 Sarma 法

熊 将^{1,2}, 王 涛², 盛 谦³

(1. 北京勘测设计研究院, 北京 100024; 2. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 在研究 Sarma 法原理及其应用的基础上, 针对库区蓄水后边坡的特点对传统的 Sarma 法做了改进。巧妙地将浮力应用在改进中, 并将改进成果应用到某水电站左岸边坡倾倒蠕变岩体的稳定性评价中, 简化了计算过程, 取得满意的结果。

关 键 词: Sarma 法; 稳定系数; 水下块体; 边坡; 浮力

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Improved Sarma method for computing slope stability in reservoir region

XIONG Jiang^{1,2}, WANG Tao², SHENG Qian³

(1. Beijing Institute of Survey and Design, Beijing 100024, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on researching the principle and application of Sarma method, the traditional Sarma method has been improved considering the reservoir region slopes' characteristic after storing water. Floatage is smartly added in calculation. Finally, the improved method has been applied to evaluating the stability of a creeping rocky slope at the left bank of Longtan Hydropower Station in China.

Key words: Sarma; factor of safety; underwater block; slopes; floatage

1 引 言

近些年来, 在水电、露天采矿、能源及交通等岩土工程领域出现了越来越多的高陡边坡, 而这些边坡又往往成为制约该工程是否经济合理乃至成败的重要因素。如何经济、安全、可靠地设计合理的边坡工程, 或分析评价天然边坡的稳定性, 其重大的意义更为显得越发突出。边坡稳定性分析是确定边坡是否处于稳定状态, 也决定是否需要对其进行加固与治理、防止其发生破坏的重要决策依据。与其不可分割的一个方面就是边坡稳定性分析方法的使用。

笔者在研究 Sarma 法原理及其应用的基础上, 针对库区蓄水后边坡的特点对 Sarma 法做了改进^[1~6], 巧妙的将浮力应用在计算中。并将改进成果应用到某水电站左岸边坡倾倒蠕变岩体的稳定性评价中, 取得了满意的结果。

2 传统的 Sarma 法

Sarma 法是 Sarma 于 1979 年在“边坡和堤坝稳定性分析”一文中提出的。基本原理是: 边坡破坏的滑体除非是沿一个理想的平面或弧面滑动, 才可能作一个完整的刚体运动, 否则, 滑体必须先破裂成多个可相对滑动的块体, 才可能发生滑动, 也就是说在滑体内部要发生剪切情况下才可能滑动。其第 i 块的力学模型见图 1, 滑体第 i 分块上的作用力有: 块体重量 W_i , 构造水平力 KW_i , 块体侧面上的孔隙水压力 P_{W_i} 和 $P_{W_{i+1}}$, 块体底面上水压力 U_i , 块体侧面上的总法向力 E_i , E_{i+1} ; 块体侧面上的总剪力 X_i 和 X_{i+1} , 块体底面上法向力 N_i , 块体底面上的剪力 S_i 。一般滑体的滑动力和抗滑力不相等, 要保持临界平衡, 必须施加水平力。由滑动面上和滑块侧面的临界平衡条件可得滑坡体的水平加速度。

$$K = \frac{a_n + a_{n-1}e_n + a_{n-2}e_n e_{n-1} \dots + a_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2}{P_n + P_{n-1}e_n + P_{n-2}e_n e_{n-1} \dots + P_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2} \quad (1)$$

式中

$$\left. \begin{aligned}
 e_i &= \theta_i [\sec \phi_{s_i} \cos(\phi_{b_i} - \alpha_i + \phi_{s_i} - \delta_i)]; \\
 a_i &= \theta_i [W_i \sin(\phi_{b_i} - \alpha_i) + R_i \cos \phi_{b_i} + \\
 &\quad S_{i+1} \sin(\phi_{b_i} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\phi_{b_i} - \alpha_i - \delta_i)]; \\
 P_i &= \theta_i W_i \cos(\phi_{b_i} - \alpha_i); \\
 \theta_i &= \cos \phi_{s_{i+1}} \sec(\phi_{b_i} - \alpha_i + \phi_{s_{i+1}} - \delta_{i+1}); \\
 S_i &= (c_{s_i} d_i - P_{w_i} \tan \phi_{s_i}) / F; \\
 S_{i+1} &= (c_{s_{i+1}} d_i - P_{w_{i+1}} \tan \phi_{s_{i+1}}) / F; \\
 R_i &= (c_{b_i} b \sec \alpha_i - U_i \tan \phi_{b_i}) / F;
 \end{aligned} \right\} (2)$$

c_{b_i} 为分块底面的凝聚力; c_{s_i} 为分块侧面的凝聚力; ϕ_{b_i} 为分块底面的内摩擦角; ϕ_{s_i} 为分块侧面的内摩擦角; d_i 为分块侧面的长度; l_i 为分块滑面的长度; α_i 为滑面和水平面的夹角; δ_i, δ_{i+1} 分别为分块侧面与垂直方向的夹角。

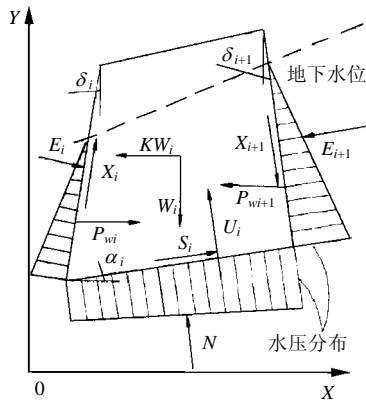


图 1 传统的 Sarma 法力学模型
Fig.1 Mechanical model of traditional Sarma method

计算稳定系数时, 首先假设稳定系数 $F=1$, 用式(1)求解 K , 此时为 K_c , 即极限水平加速度。式(1)的物理意义是, 使滑体达到极限平衡时的平衡状态, 必须在滑体上施加一个临界水平加速度 K_c 。 K_c 为正时, 方向向坡外; K_c 为负时, 方向向坡内。但计算中一般假定有一个水平加速度 K_c 的水平外力作用, 求其稳定系数 F 。此时要采用改变 F 值的方法, 即初定一个 $F=F_0$, 计算 K , 比较 K 与 K_0 是否接近精度要求, 若不满足, 要改变 F 值大小, 直到满足 $|K-K_0| \leq \varepsilon$, 此时的 F 值即为稳定系数。

Sarma 法的特点是用极限加速度 K_c 来描述边坡

的稳定程度, 它可以用于评价各种破坏模式下边坡稳定性, 诸如平面破坏、楔形体破坏、圆弧面破坏和非圆弧面破坏等, 而且它的条块的分条是任意的(但不能水平分条), 无需条块边界垂直, 从而可以对各种特殊的边坡破坏模式进行稳定性分析。

3 Sarma 法的改进

Sarma 法应用广泛, 但它也存在着不足, 它要求地下水位线必须穿过块体的侧面。但是, 目前很多水库蓄水后的边坡稳定性评价问题却不能做到这一点, 有很多块体是完全淹没在水面以下。为此, 笔者对 Sarma 法块体淹没在水下的问题改进。

水下块体的受力如图 2 所示。从图可以看出, 水下块体多了一个块体顶部的水压力 V_i , 而且它在各个面上的水压力均呈梯形分布。为了解决这个问题, 笔者把浮力应用到计算中, 此时 4 个面上水压力的矢量之和即为浮力, 即

$$\vec{F}_i = \vec{U}_i + \vec{V}_i + \vec{P}_{wi} + \vec{P}_{wi+1} \quad (3)$$

浮力 \vec{F}_i 的大小为块体体积 (M) 和水的重度 γ_w 之积, 其方向为竖直方向。

$$\vec{F}_i = \gamma_w M_i \quad (4)$$

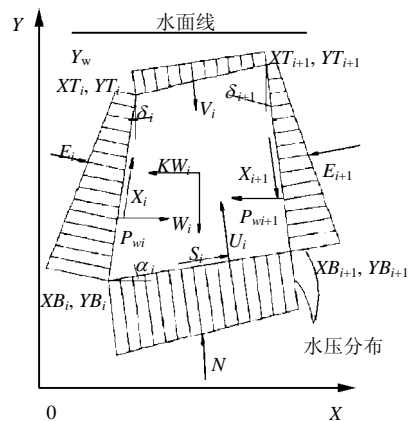


图 2 水下块体力学模型
Fig.2 Mechanical model of underwater block

下面就式(3)展开证明: 假设水面线的 Y 坐标为 Y_w , 由水力学静水压力分别求出 \vec{V}_i , \vec{P}_{wi} , \vec{P}_{wi+1} , \vec{U}_i 和 \vec{F}_i , 并计算各个压力分别在 X 和 Y 两个方向的分力见表 1。

表 1 水压力分量
Table 1 Components pressure

压力	X 方向的分力	Y 方向的分力
\vec{V}_i	$X_1 : \frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_i) + (Y_w - YT_{i+1})](YT_{i+1} - YT_i)$	$Y_1 : -\frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_i) + (Y_w - YT_{i+1})](XT_{i+1} - XT_i)$
\vec{P}_{wi}	$X_2 : \frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_i) + (Y_w - YB_i)](YT_i - YB_i)$	$Y_2 : -\frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_i) + (Y_w - YB_i)](XT_i - XB_i)$
\vec{P}_{wi+1}	$X_3 : -\frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_{i+1}) + (Y_w - YB_{i+1})](YT_{i+1} - YB_{i+1})$	$Y_3 : -\frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YT_{i+1}) + (Y_w - YB_{i+1})](XT_{i+1} - XB_{i+1})$
\vec{U}_i	$X_4 : -\frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YB_i) + (Y_w - YB_{i+1})](YB_{i+1} - YB_i)$	$Y_4 : \frac{\gamma_w}{2}[(Y_w - YB_i) + (Y_w - YB_{i+1})](XB_{i+1} - XB_i)$
\vec{F}_i	$X_5 : 0$	$Y_5 : \frac{\gamma_w}{2}[(YB_i - YT_{i+1})(XT_i - XB_{i+1}) + (YT_i - YB_{i+1})(XT_{i+1} - XB_i)]$

$\vec{U}_i + \vec{V}_i + \vec{P}_{wi} + \vec{P}_{wi+1}$ 的合力在 X 和 Y 两个方向的分力 $\sum X_i$ 和 $\sum Y_i$ (见表 1) 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 ; \\ \sum Y_i &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

化简并整理即可以得到：

$$\sum X_i = 0 ; \sum Y_i = Y_5 \quad (6)$$

由此得出式(3)，即 $\vec{F}_i = \vec{U}_i + \vec{V}_i + \vec{P}_{wi} + \vec{P}_{wi+1}$ 。通过这些改进，使传统的 Sarma 法不能考虑的水下块体问题得以解决。将改进后的 Sarma 法应用于工程实例中，计算某水电站左岸边坡倾倒蠕变岩体的稳定系数，并评价此边坡的稳定性。

4 某水电站左岸边坡倾倒蠕变岩体稳定性评价

4.1 最危险剖面的确定

采用 GIS 方法，模拟某水电站坝区高边坡实体模型，并结合坝址区工程地质报告分析得出边坡的两个最不稳定剖面：倾倒蠕变岩体剖面 A 和 B。此两个剖面中，剖面 A 一般不存在连续的贯穿性弯曲折断面，而剖面 B 已形成贯穿性、连续性较好、粗糙不平、锯齿状的顺坡向折断错滑面和折断面，因此剖面 B 是此倾倒蠕变岩体中的最危险剖面。在后来的稳定性评价中，主要是针对剖面 B 做安全系数的计算和稳定性分析评价。此滑动面即可视为贯穿的折断面。其稳定性分析计算剖面如图 3 所示。

4.2 计算工况

根据某水电站水库的蓄水情况，考虑蓄水前、初期正常蓄水位和后期正常蓄水位三种情况下剖面 B 的稳定情况(见表 2)：

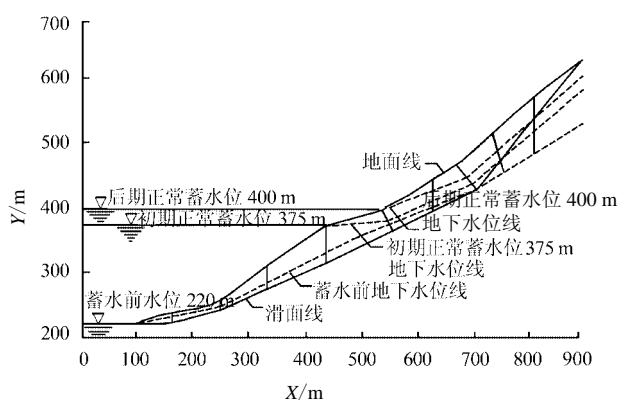


图 3 边坡稳定性分析计算剖面
Fig.3 Section of analyzing and calculating stability of slope

表 2 计算工况
Table 2 Calculational working cases

工况	位置
1	蓄水前 220 m 水位
2	初期正常蓄水位 375 m
3	后期正常蓄水位 400 m

4.3 力学参数的选择

根据资料，主要力学参数 ϕ ， c 和 γ 取值见表 3。

表 3 力学参数
Table 3 Mechanic of parameters

状态	滑动面		滑体		重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
	$\phi / (^\circ)$	c / MPa	$\phi / (^\circ)$	c / MPa	
天然	28	23	30	24	22
饱和	26	20	27	20	19

在实际稳定问题中，边坡岩土并非象传统的稳定性分析方法所假设的那样都处于饱和或天然状态，而是处于动态的饱和-非饱和状态。笔者认为，在浸润线(即地下水位线)以下的部分为饱和状态，该部分岩土取为饱和岩土的强度参数值；对浸润线(即地下水位线)以上部分为非饱和状态，该部分岩

土取为天然状态的强度参数值。

在Sarma法计算中,对条块的强度参数进行一定的处理后才选取。对于条块底面,强度参数的选取比较简单;但对于条块侧面,存在饱和和天然两种状态,选取两种状态的强度参数,然后按照经验式(7)计算。

$$\bar{c} = \frac{A'c + (A - A')c'}{A}; \quad \bar{\phi} = \frac{A'\phi + (A - A')\phi'}{A} \quad (7)$$

式中 A 为整个条块的面积; A' 为条块中天然岩土部分的面积。

4.4 稳定性评价

稳定系数的计算采用Sarma法的FORTRAN程序计算,将各几何参数及力学强度参数输入程序中即可算出稳定系数,见表4。

表4 稳定系数计算成果

Table 4 Calculational result of safety factor of stability

工况	1	2	3
稳定系数 F_s	1.130	1.007	0.976

根据《岩土工程勘察规范》规定:验算已有边坡的稳定性时, F_s 值可采用 1.10~1.25。故在蓄水前 ($F_s=1.130$) 倾倒蠕变岩体在向岸坡方向缓慢弯曲,但目前来说它还是处于基本稳定状态,短期内不会发生大规模的崩塌或滑坡,但应该对其进行监测。在蓄水后稳定系数明显减小:在初期正常高水位 375 m 时,稳定系数为 1.007,在后期正常高水位 400 m 时,稳定系数为 0.976,此时已远小于规范值 1.10~1.25。也就是说,在蓄水后很有可能导致崩塌或滑坡的发生。研究认为,在蓄水前应对此倾倒蠕变岩体进行治理。

5 结论

综合本文研究工作可得出以下结论:

(1) Sarma 法是一种应用非常广泛的计算方法,它可以用于评价各种破坏模式下边坡稳定性,诸如平面破坏、楔形体破坏、圆弧面破坏和非圆弧面破坏等,而且它的条块的分条是任意的(但不能水平分

条),无需条块边界垂直,从而可以对各种特殊的边坡破坏模式进行稳定性分析。

(2) 通过对 Sarma 法的改进,使传统的 Sarma 法没有考虑到的问题得以解决,也就是说增大了它的应用范围。而且巧妙的将浮力应用于计算中,大大地简化了计算过程。

(3) 通过改进的 Sarma 法对某水电站左岸边坡倾倒蠕变岩体的稳定性计算,认为蓄水前处于基本稳定状态,蓄水后很有可能发生崩塌或滑坡,因此应对其进行治理。在蓄水后的计算过程中,有些条块底面及侧面的剪应力出现负值,也就是说,此时已发生了局部失稳,这也就更增大了崩塌或滑坡发生的可能性。所以在治理中应考虑到局部失稳情况。

参 考 文 献

- [1] 王涛,丁志雄,周先前. 边坡工程研究的历史与展望[J]. 中国农村水利水电, 2003, (增刊): 105—106.
WANG Tao, DING Zhi-xiong, ZHOU Xian-qian. Review and prospect of the research of slope engineering[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2003, (Sup.): 105—106.
- [2] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 379—392.
- [3] 黄运飞, 冯静. 计算工程地质[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [4] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [5] 林峰, 黄润秋. 边坡稳定性极限平衡条分法的探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(4): 9—13.
LIN Feng, HUANG Yun-qiu. A Study on the limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1997, 8(4): 9—13.
- [6] 薛守义, 刘汉东. 岩体工程学科性质透视[M]. 河南: 黄河水利出版社, 2002. 105—112.