

# 鱼洞河滑坡稳定性三维极限平衡分析

汪华斌<sup>1</sup>, 徐瑞春<sup>2</sup>, 姜清辉<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2 水利部长江委三峡勘测研究院, 湖北 宜昌 443003; 3 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 结合三维极限稳定性评价算法, 选取一定的参数对鱼洞河滑坡整体滑体、下段滑体和东边湾次级滑体在不同地下水位情况下的稳定性系数进行计算, 结果表明鱼洞河滑坡整体滑体沿底滑带滑动时, 最小稳定系数为 1.130; 下段滑体最小稳定数为 1.121, 基本反映该滑体稳定状况良好。东边湾次级滑体稳定性系数在 1.0 左右, 稳定性较差, 有可能在一定的外界条件作用下产生再次滑动。

**关键词:** 鱼洞河滑坡; 三维极限平衡分析; 稳定性评价

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

## 0 引言

边坡稳定性评价在工程实践中常常作为二维问题来处理, 主要采用二维刚体极限平衡方法, 在分析滑坡的受力和其形成过程中, 忽略滑体的内部变形, 认为滑体为不可变形的刚体, 同时假定滑体处于极限强度状态, 在考虑稳定系数后, 滑体在所受各种力的作用下处于平衡状态。虽然在一般情况下二维处理能够满足一般要求, 但严格地讲, 边坡稳定性分析是一个三维问题, 特别是对于具有复杂几何形状的情况更是如此, 国内外皆有人对此进行研究<sup>[1~3]</sup>。为了对滑坡地质体稳定系数有更科学合理的计算, 以 SSA-3D(三维极限平衡分析)为主要计算方法, 来实现鱼洞河滑坡的稳定性评价。

水布垭水利枢纽是鄂西清江干流三级大型梯级工程之一, 库首近坝地段及坝区环境地质问题十分突出而复杂<sup>[4]</sup>, 是水布垭水电站最突出的工程地质问题之一, 特别是近坝地段的鱼洞河滑坡稳定性的综合研究显得相当重要。结合鱼洞河滑坡地质结构特征和影响其稳定性的诸因素分析, 三维极限平衡法采用铅垂条块, 所做的假设以反映三维稳定性的实质为基础, 综合考虑工程上可能的滑动方向、地下水作用、地震等因素, 在测制有关滑坡基岩面等高线图、滑坡堆积物等厚度图, 同时以 1:10 000 地形图和滑坡纵横剖面图为基础, 在滑坡地质体(坡面、滑

面)可视化中, 采用以二维数据输入, 按一定的插值方法, 绘制了其空间形状。在已建立的滑坡三维地质体过程中, 按照  $X, Y$  方向均可自动显示滑坡不同位置的剖面示意图。之后采用三维极限平衡计算方法得到鱼洞河整体、下段滑体以及东边湾次级滑体在不同水位状况下的稳定系数。

## 1 三维极限平衡计算方法<sup>[5]</sup>

### 1.1 作用在条块上的力

作用在条块上的力如图 1 所示。作用在条块  $(i, j)$  4 个侧面上的条块间的相互作用力如下: 作用在  $A'ABB'$  面上和  $O'OCC'$  面上的法向力  $P_{xa}, P_{xb}$ ; 作用在  $A'ABB'$  面上的  $O'OCC'$  面上的水平方向  $T_{ya}, T_{yb}$ ; 作用在  $B'BCC'$  面上的  $A'AOO'$  面上的法向力  $P_{ya}, P_{yb}$ ; 作用在  $B'BCC'$  面上和  $A'AOO'$  面上的水平方向剪力  $T_{xa}, T_{xb}$ 。

忽略条块 4 个侧面( $A'ABB', O'OCC', B'BCC'$  和  $A'AOO'$ )上沿铅垂方向的剪力。作用在条块上的力还有: 抗滑力  $S_{ij}$ ; 作用在底面的反力  $N_{ij}$ ; 作用在底面的水压力  $U_{ij}$ ; 条块重力  $W_{ij}$ ; 作用在侧面  $A'ABB'$  和  $O'OCC'$  上的水压力和  $U_{xij}$ (沿  $x$  轴方向为正); 水平方向地震力  $H_{ij}$ (沿  $x$  轴方向为正), 记  $Q_{ij} = H_{ij} + U_{xij}$ ; 坡面上水压力  $F_{ij}$ (垂直于坡面), 当坡面高程大于水位时,  $F_{ij} = 0$ ,  $F_{ij}$  在  $ox$  方向投影为  $F_{xij}$ , 与  $ox$  方向相反时为正,  $F_{ij}$  在竖直方向投影为  $F_{zij}$ , 向

收稿日期: 2001-12-15。

基金项目: 长江水利勘测委员会横向基金资助。

作者简介: 汪华斌(1968-), 男, 湖北汉川人, 博士, 毕业于中国地质大学, 目前主要从事地质灾害、构造地质研究。

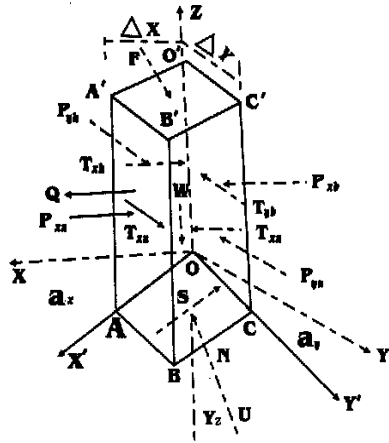


图 1 铅垂条块与受力情况

Fig. 1 The column and forces acting on it

下为正。

1.2 计算方法

1. 在条块间相互作用中, 忽略 4 个侧面上铅垂方向的剪力。若滑面为球面, 旋转椭圆面等规则光滑曲面, 滑体失稳时, 条块间没有明显相对错动, 此时忽略上述剪力较真实地反映了实际情况。若剪切面形状不规则, 忽略上述剪力就导致了一个比实际情况较为危险的情况, 计算出安全系数比实际情况偏小, 有一定安全度, 结果仍可供参考。

2. 利用铅垂方向力的平衡条件, 以及沿  $OX'$  方向的力平衡条件, 在整个滑体范围内, 确定安全系数。

设  $C_{ij}$ ,  $f_{ij}$ ,  $A_{ij}$  分别为条块  $(i, j)$  滑面的粘结力、摩擦系数、条块的底面面积。

$$S_{ij} = (C_{ij} A_{ij} + N_{ij} f_{ij}) / K \quad (1)$$

由铅垂向力的平衡

$$N_{ij} \cos \gamma_{zj} + U_{ij} \cos \gamma_{zj} + \frac{C_{ij} A_{ij} + N_{ij} f_{ij}}{K} \sin \alpha_{xj} = W_{ij} + F_{zj} \quad (2)$$

可得到

$$N_{ij} = \frac{W_{ij} + F_{zj} - U_{ij} \cos \gamma_{zj} - \frac{C_{ij} A_{ij}}{K} \sin \alpha_{xj}}{\cos \gamma_{zj} + \frac{f_{ij}}{K} \sin \alpha_{xj}} \quad (3)$$

沿  $OX'$  方向力的平衡, 对于条块  $(i, j)$ , 可写出

$$S_{ij} = -(P_{xaij} - P_{xbj} + T_{xbj} - T_{xij}) \cos \alpha_{xj} + (Q_{ij} - F_{xij}) \cos \alpha_{xj} + (W_{ij} + F_{zj}) \sin \alpha_{xj} \quad (4)$$

$$P_{xaij} - P_{xbj} + T_{xbj} - T_{xij} = -\frac{\sec \alpha_{xj}}{K} (C_{ij} A_{ij} +$$

$$N_{ij} f_{ij}) + (Q_{ij} - F_{xij}) + (W_{ij} + F_{zj}) \sin \alpha_{xj} \quad (5)$$

条块间相互作用力成对出现, 大小相等, 方向相反

$$P_{xaij} - P_{xb(i+1)j} = 0 \quad (6)$$

$$T_{xaij} - T_{xb(i+1)j} = 0 \quad (7)$$

对全部条块求和, 有

$$-\sum \frac{\sec \alpha_{xj}}{K} (C_{ij} A_{ij} + N_{ij} f_{ij}) + \sum (Q_{ij} - F_{xij}) + \sum (W_{ij} + F_{zj}) \tan \alpha_{xj} = 0 \quad (8)$$

$$K = \frac{\sum \sec \alpha_{xj} (C_{ij} A_{ij} + N_{ij} f_{ij})}{\sum (Q_{ij} - F_{xij}) + \sum (W_{ij} + F_{zj}) \tan \alpha_{xj}} \quad (9)$$

将式(2)代入式(9), 得到安全系数三维公式

$$K = \frac{\sum \{ C_{ij} A_{ij} \cos \gamma_{zj} + [(W_{ij} + F_{zj}) - U_{ij} \cos \gamma_{zj}] f_{ij} \}}{\sum (Q_{ij} - F_{xij}) + \sum (W_{ij} + F_{zj}) \tan \alpha_{xj}} \times \frac{\sec \alpha_{xj}}{\cos \gamma_{zj} + \frac{f_{ij}}{K} \sin \alpha_{xj}}$$

2 稳定性计算条件

鱼洞河滑坡包括上下滑体以及两个次级滑体, 本次计算主要针对鱼洞河整体滑坡、下滑体以及东边湾次级滑体, 分别计算其在水位条件下和有地震力的作用情况下的稳定性。在鱼洞河稳定性滑坡三维极限平衡的分析中, 主要的计算参数包括滑体介质、滑面、及其物理力学参数、地下水位、地震力和滑动方向等。

2.1 物理力学参数

结合相关极限平衡稳定分析反演计算结果(表1)和国内有关滑坡稳定分析  $C$ 、 $\phi$  值取值, 确定了本次计算所需的相关物理力学参数(表2, 3)。

表 1 鱼洞河滑坡  $C$ 、 $\phi$  反算分析推荐成果表

Table 1 Recommended parameters of  $C$  and  $\phi$  in Yudonghe landslide

滑 坡	发育阶段	稳定系数	$C$ (KPa)	$\phi$ (°)
鱼洞河上段	稳定固结	1.15 ~ 1.20	30.0 ~ 40.0	13.85 ~ 15.47
鱼洞河下段	稳定固结	1.10 ~ 1.15	30.0 ~ 40.0	17.91 ~ 19.16

表 2 采用的滑面抗剪强度参数

Table 2 Strength parameters of sliding surfaces

部 位	$C$ (KPa)		$\phi$ (°)	
	饱水	非饱水	饱水	非饱水
整体滑体底滑带	16.0	20.0	18	20
下滑体底滑带	17.0	20.0	18	21
东边湾次级滑体底滑带	16.0	20	17	19

表3 滑体介质物理力学参数

部 位	容重(KN/m <sup>3</sup> )		C (KPa)	φ (°)
	天然容重	饱和容重		
整体滑体	23.0	24.5	23	25
下段滑体	24.0	25	22	25
东边湾次级滑体	22.5	24	22	24

2.2 地下水位

在本次计算中采用了3个不同地下水位分布:枯水位(200 m)、225 m、400 m。地下水位的相关数据一方面以钻孔实测为主,另一方面,结合水库蓄水以后地下水位在滑坡分布中的涨幅状况进行了一定程度的推测计算。

2.3 自重

计算条块自重时,位于地下水位以上部分与采用天然容重,地下水位以下部分用饱和容重。

2.4 地下水压力及库水压力

应考虑条块两面的地下水压力分布及底面地下水压力分布,当条块上表面淹没于库水位之下时,要考虑上表面承受的压力。

2.5 地震

在三维极限平衡计算中考虑水平面向地震惯性力,条块承受的地震惯性力计算公式为

$$P_{ij}=K_h\cdot C_z\cdot \alpha\cdot W_{ij}$$

式中  $K_h$  为水平向地震系数,取  $K_h=0.04$ ;  $C_z$  为综合影响系数,取  $C_z=1/4$ ;  $\alpha$  为地震加速分布系数,取  $\alpha=0.908$ ,以上几个值的取值依据参照湖北省地震局相关报告;  $W_{ij}$  为柱体的重量。

2.6 滑动方向

鱼洞河滑坡形成过程包括三个不同序次的滑动,本次计算中,对鱼洞河滑坡整体滑体以及下滑体采用1—1线以及2—2线(图2),代表最有可能的滑动方向;东边湾次级滑体则选取3—3线和4—4线以表示滑坡滑动方向。

3 计算结果及稳定性分析

3.1 整体性滑体稳定性计算

整体性滑体包括鱼洞河滑坡上下滑体,计算以底滑带为主,计算结果如表4。

从以上结果分析,鱼洞河整体滑体沿底滑带滑动时,最小稳定系数为1.130,对应于有地震、沿2—2线滑动、200 m水位的情况。在滑坡处于400 m水位时,整体性滑体稳定性反而居高,说明滑坡在蓄水

以后,库水静压力有助于滑坡整体稳定。以上的计算结果基本与二维极限平衡计算结果(鱼洞河整体在400m水位稳定性系数为1.258)。

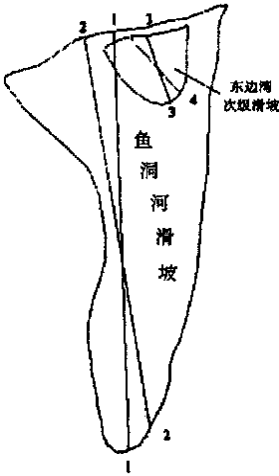


图2 鱼洞河滑动方向示意图

Fig. 2 Slide onetations of landslide

表4 鱼洞河滑坡整体滑体稳定系数

Table 4 Factors of stability for the global sliding body of Yudonghe landslide

水位	滑动方向	底滑带	
		无地震	有地震
200m	1—1 线	1.266	1.225
	2—2 线	1.165	1.130
225m	1—1 线	1.252	1.209
	2—2 线	1.152	1.115
400m	1—1 线	1.285	1.227
	2—2 线	1.191	1.140

3.2 鱼洞河下段滑体稳定性计算

鱼洞河下段滑体采用按球形滑面的确定方法,前缘两端点固定,对R取不同的值,构成了对潜在危险面的搜索。同样,其滑动方向分别考虑1—1和2—2两种情况,水位则为200 m、225 m以及400 m,计算结果表明,在200 m水位沿1—1方向滑动的最小稳定系数为1.231,沿2—2方向则为1.139;在225 m水位沿1—1方向滑动的最小稳定系数为1.213,沿2—2则为1.121;而在400 m水位沿1—1方向滑动的最小稳定系数为1.231,沿2—2方向仅为1.149。总的说来,鱼洞河下段滑体最小稳定数为1.121,对应于225 m水位、有地震的情况下,球心相对座标为(1 602.3, 463.0, 509.9),搜索球半径为572.7。其余计算结果均大于此值,基本反映该滑体稳定状况良好。

3.3 东边湾次级滑体稳定性系数计算

东边湾次级滑体平面呈扇形, 体积 400 万 m<sup>3</sup>, 该滑体滑动的证明主要是滑体内铁矿层矿石与地表分布的该标志层的明显错动, 稳定性计算结果如表 5 所示。

表 5 东边湾次级滑体稳定系数

Table 5 Factors of stability for the secondary sliding body in the eastern of Yudonghe landslide

水位	滑动方向	东边湾次级滑体	
		无地震	有地震
200m	3—3	1.066	1.038
	4—4	1.003	0.978
225m	3—3	1.034	1.006
	4—4	0.969	0.944
400m	3—3	1.084	1.039
	4—4	1.000	1.096

该滑体稳定性系数在 1.0 左右, 稳定性较差, 但是在大坝满库蓄水以后, 滑体全部被淹没, 水利枢纽施工期间, 应注意其滑动产生的涌浪危险, 经计算<sup>1)</sup>, 该滑体 225 m 水位时, 在面板堆石坝围堰处的波及浪高为 9.6 m~10.4 m, 对基坑施工会造成一定的危害。

4 结论与建议

综合以上对鱼洞河滑坡整体、下段滑体以及东

边湾次级滑坡稳定系数的计算结果分析, 鱼洞河滑坡整体滑体沿底滑带滑动时, 最小稳定系数为 1.130; 下段滑体最小稳定数为 1.121, 基本反映该滑体稳定状况良好。东边湾次级滑体稳定性系数在 1.0 左右, 稳定性较差, 鱼洞河整体以及下段滑体在不同情况条件下, 稳定性较好, 失稳的可能性较小, 而东边湾次级滑体则稳定性比较差, 有可能在一定的外界条件作用下产生再次滑动, 应加强施工期间对该滑体必需的变形监测, 可能的情况下还需采取一定的防治措施, 以免对基坑施工造成不必要的经济损失。

参考文献:

[ 1 ] Chen R.H, Chameau J. L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes[ J] . *Geotechnique*, 1982, **32**: 31~40.  
[ 2 ] Hutchinson J. N, Sama S. K. Discussion on three-dimensional limit equilibrium analysis of slope[ J] . *Geotechnique*, 1985, **35**: 215~216.  
[ 3 ] Hungr O, Salgado F.M, Byrne D.M. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. *Canad. Geotech. Journal*, 1989, **26**: 679~686.  
[ 4 ] 徐瑞春. 水布垭坝址区环境地质研究[ J] . 人民长江, 1998, **29**(8): 15~17.  
[ 5 ] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[ J] . 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 657~661.

Stability Evaluation of Three Dimensional Limit Equilibrium on Yudonghe Landslide

WANG Hua-bin<sup>1</sup>, XU Rui-chun<sup>2</sup> and JIANG Qing-hui<sup>3</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China;  
2. Survey Institute of Three Gorges, The Yangtze River Water Conservancy Commission, Yichang 443003 China;  
3. Wuhan University, 430072 China)

**Abstract:** During of the stability evaluation, the whole sliding body, lower sliding body and eastern secondary sliding body were chosen as the objects of study. After the parameters were selected correctly, the stability coefficients of different objects were calculated on different conditions of water level and on different sliding directions based on the 3D limit equilibrium method. Regarding to the whole sliding body, the smallest stability coefficient is 1.130 on the presupposition of sliding along bottom slide zone. With regard to the lower sliding body, the dangerous planes were repeatedly searched, and different stability coefficients were calculated on different dangerous planes with the presupposition of sliding along bottom slide zone. General speaking, the smallest stability coefficient of the lower sliding body is 1.121, which was ca-

1) 水利部长江委清江地质大队. 清江水布垭水电站坝址区环境地质勘查与研究报告. 1998—04.  
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

culated on conditions of earthquake, on the sliding direction of  $2 \sim 2$ , and on the 225m of water level, and the results reflected the lower sliding body was on well stable stage. As for the secondary landslide in the eastern, the stability coefficient is 1.0 or so on different conditions, which reflected this slide was at dangerous state and it was to fail again when the outside conditions changed. Therefore, it is necessary to pay much attention to the danger of surge resulted from secondary landslide in the eastern during the construction of project, and strengthen its deformation monitoring, indispensable prevention measures will be taken if possible.

**Key words:** yudonghe landslide; 3D limit equilibrium method ; stability evaluation

## 中国科学院东川泥石流观测研究站简介

中国科学院东川泥石流观测研究站(简称东川站)始建于 1961 年, 1988 年被中国科学院正式批准为首批野外开放站, 依托中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所, 2000 年被科技部正式列入国家重点野外科学观测试验站(试点站), 并于 2001 年 10 月正式授牌。

东川站位于云南省昆明市东川区绿茂乡蒋家沟。蒋家沟是被国内外专家誉为“天然泥石流博物馆”的小江中游右岸的一级支沟, 流域面积  $48.6\text{km}^2$ , 海拔  $1\,042\text{m} \sim 3\,269\text{m}$ 。由于地形、地质和水条件的特殊性, 蒋家沟成为小江流域泥石流暴发最频繁的一条典型泥石流沟, 平均每年发生泥石流 15 场左右, 最多可达每年 28 场。如此高频率的泥石流, 属国内外罕见, 为泥石流野外观测、试验和研究提供了得天独厚的条件, 这种极为宝贵和丰富的泥石流研究天然资源使得东川站成为我国乃至全世界进行泥石流观测、试验和研究的重要基地。每年吸引大批国内外学者来站访问、讲学与合作研究, 曾与美国、日本、新西兰、委内瑞拉等 10 余个国家和地区进行国际合作。承担了一批国家自然科学基金和科学院知识创新等国家和地方研究任务。在过去 30 多年里, 取得了大量的第一手观测、实验资料, 并在泥石流发生、运动、堆积机理与过程、泥石流预测预报、警报、综合防治等方面取得了大量的研究成果, 为泥石流基础理论和减灾技术研究以及人才培养做出了重要贡献。随着中国科学院知识创新工程的实施, 东川站将成为泥石流研究原始创新的重要基地, 发挥其更重要的作用。