

# 三维极限平衡法 在不同滑动破坏模式下的边坡稳定性分析

林雁<sup>1</sup>, 董庆<sup>2</sup>, 张珂<sup>1</sup>

(1 安徽广播电视大学 城市建设学院, 合肥 230022; 2 安徽交通职业技术学院, 合肥 230001)

**摘要:** 结合双鸡沟边坡两种不同滑动破坏模式, 基于三维 Spencer 法运用 3D-SLOPE 软件对边坡稳定进行分析计算。针对边坡变形体, 分别拟定了八种计算工况, 根据三维极限平衡分析, 得到两种滑动模式在不同工况下, 仅有一种滑动模式库水骤降时的边坡稳定性不能满足规范要求, 其余均能满足规范要求, 可以为工程实践提供依据。

**关键词:** 三维极限平衡; 边坡稳定性; 3D-SLOPE

**中图分类号:** TU457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-6021(2017)03-0120-05

## 一、引言

我国土地面积大, 涉及地质地貌丰富, 天气多变, 因此, 一些丘陵地区不稳定的边坡滑动或崩塌破坏时常发生。这些破坏会给房屋、公共交通、水库堤坝等带来一系列的影响和破坏, 势必造成损失。所以, 边坡稳定问题一直是岩土工程领域关注的重点。

在大量的工程实践中二维极限平衡法的应用已经很广泛, 二维计算数据不能有效地把滑坡体内部复杂的情况表达出来, 同时由于边坡的空间特征, 近年来边坡稳定发展主要应用于三维极限平衡分析方法<sup>[1-4]</sup>。结合双鸡沟边坡工程, 本文运用改进的条柱受力模型, 采用 3D-SLOPE 软件<sup>[5]</sup>对局部滑动和整体滑动进行分析, 通过边坡变形体蓄水前和蓄水后的工况计算分析边坡稳定结果, 为工程实践提供理论依据。

## 二、三维极限平衡分析方法

### (一) 三维 Spencer 法模型

Spencer 法<sup>[6-7]</sup>是一种能迎合复杂滑面形状的算法, 且能很好地收敛, 是一种考虑力平衡和力矩平衡的刚体极限平衡严格解法, 在边坡稳定分析计算中使用该方法比较普遍。按照三维 Spencer 法的假定, 不考虑剪力作用在条柱 $(i, j)$  4 个侧面上, 条柱间的相

互作用力表示如下: 作用在行界面  $EABF$  面上和  $HDCG$  面上的法向力为  $E_{ij}, E_{i-1,j}$ , 竖直方向剪力为  $X_{ij}, X_{i-1,j}$ ; 作用在列界面  $EABF$  面上和  $HDCG$  面上的法向力  $Q_{ij}, Q_{i,j-1}$ , 竖直方向剪力为  $G_{ij}, G_{i,j-1}$ 。

如图 1 作用的力有: 底部的抗滑力  $S_{ij}$ 、有效法向力为  $N'_{ij}$ 、孔隙水压力合力  $U_{ij}$ ; 条块重力  $W_{ij}$ , 水平方向地震力  $K_c W_{ij}$  ( $K_c$  为地震影响系数); 作用在条块顶部的的外荷载  $F_{ij} = [F_{ij}^x \ F_{ij}^y \ F_{ij}^z]^T$ , 作用点近似为条块顶部中心点。

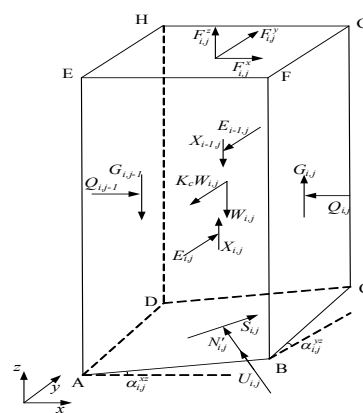


图 1 铅直条柱及作用力

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 安徽省教育厅自然科学重点研究项目(项目编号: KJ2016A112)。

作者简介: 林雁(1980-), 女, 福建三明人, 讲师, 硕士。研究方向: 土木工程。

## (二)安全系数计算

记条块底滑面单位法向矢量  $\mathbf{n}=[n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ , 条块底滑面剪切力  $S_{i,j}$  的单位矢量为  $\mathbf{s}=[f_1 \ f_2 \ f_3]^T$ , 取条柱底部滑面竖直向力的平衡, 可得:

$$-W_{ij} + F_{ij}^z + (N'_{ij} + U_{ij})m_3 + S_{ij}f_3 + X_{ij} - X_{i-1,j} + G_{ij} - G_{i-1,j} = 0 \quad (1)$$

条柱底部剪切力  $S_{i,j}$  为:

$$S_{i,j} = (tg\varphi'N'_{ij} + c'A_{i,j})/F_s \quad (2)$$

式中:  $\varphi', c'$  为有效摩擦角和内聚力,  $A_{i,j}$  为条柱底滑面的面积,  $F_s$  为安全系数。

根据三维 Spencer 法的假定, 行界面竖直向剪力和列界面竖直向剪力分别为:

$$X_{ij} = \lambda_1 f_1(x, y) E_{ij}, \quad X_{i-1,j} = \lambda_1 f_1(x, y) E_{i-1,j} \quad (3)$$

$$G_{ij} = \lambda_2 f_2(x, y) Q_{ij}, \quad G_{i-1,j} = \lambda_2 f_2(x, y) Q_{i-1,j} \quad (4)$$

通过式(3)、式(4)和式(1)可得:

$$N'_{ij} = (L_{ij}^z - \lambda_1 f_1 E_{ij} + \lambda_1 f_1 E_{i-1,j} - \lambda_2 f_2 Q_{ij} + \lambda_2 f_2 Q_{i-1,j}) / m_{\omega ij}^z - U_{ij} \quad (5)$$

式中:

$$L_{ij}^z = W_{ij} - F_{ij}^z + tg\varphi' U_{ij} f_3 / F_s - c'A_{ij} f_3 / F_s, \quad m_{\omega ij}^z = m_3 + f_3 tg\varphi' / F_s \quad (6)$$

取y轴方向的静力平衡, 可得:

$$E_{ij} - E_{i-1,j} + m_{\omega ij}^y (N'_{ij} + U_{ij}) = L_{ij}^y \quad (7)$$

式中:

$$m_{\omega ij}^y = m_2 + f_2 tg\varphi' / F_s, \quad L_{ij}^y = K_c W_{ij} \eta_2 - F_{ij}^y + tg\varphi' U_{ij} f_2 / F_s - c'A_{ij} f_2 / F_s \quad (8)$$

取x轴方向的静力平衡, 可得:

$$-Q_{ij} + Q_{i,j-1} + m_{\omega ij}^x N_{ij} = L_{ij}^x \quad (9)$$

式中:

$$m_{\omega ij}^x = m_1 + f_1 tg\varphi' / F_s, \quad L_{ij}^x = K_c W_{ij} \eta_1 - F_{ij}^x + tg\varphi' U_{ij} f_1 / F_s - c'A_{ij} f_1 / F_s \quad (10)$$

建立绕y轴向的总体力矩平衡, 可得:

$$\sum N_{ij}(n_1 z_0 - n_3 x_0) + \sum S_{ij}(f_1 z_0 - f_3 x_0) + \sum (-W_{ij} z_0 + K_c W_{ij}(z_0 + h/2) + F_{ij}^y z_0 - F_{ij}^x x_0) = 0 \quad (11)$$

从上述推导可知, 建立的平衡方程组满足空间3个力的平衡条件和1个力矩平衡条件, 通过(1)、(7)、(9)和(11)式可求解滑体的安全系数、行界面条间力倾角、列界面条间力倾角和主滑动方向。

## 三、工程实例

### (一)工程概况

双鸡沟边坡位于金平水电站库区双鸡沟沟口右岸, 边坡基本与金汤河流向平行。临河侧高程3 027~3 083m为基岩陡壁, 出露基岩大部为三迭系下统波茨沟组千枚岩、砂岩夹灰岩, 临双鸡沟侧出露二迭系上统大石包组块状玄武岩, 岩层倾向金汤河上游偏右岸, 且倾角较大, 岩层走向基本垂直开挖坡面或金汤河流向, 为横向坡, 总体稳定。双鸡沟边坡距坝址仅850m, 边坡下游以双鸡沟沟口为界, 上游以金汤河为界, 坡脚处有公路穿过, 经现场踏勘, 覆盖层土体为第四纪的堆积体, 物质主要为褐黄色碎石混合土及含黏土质的砾石, 其中坡体中部较细, 为含黏土质的砾石, 坡体两侧较粗, 为碎石混合土。

当水库按照要求蓄水后, 一般水深都没过水库的坡脚, 岸边可能会发生坍塌现象, 对首部枢纽建筑物(大坝及引水隧洞进水口)的安全运行产生重大影响。为了确保边坡在运行期的稳定与安全, 本文采用三维极限平衡方法对双鸡沟边坡的稳定性进行分析。

### (二)计算分析

#### 1. 计算范围

为全面了解双鸡沟边坡在水库运行过程中的稳定性, 本项研究计算范围涵盖了1-1~6-6剖面, 如图2所示。

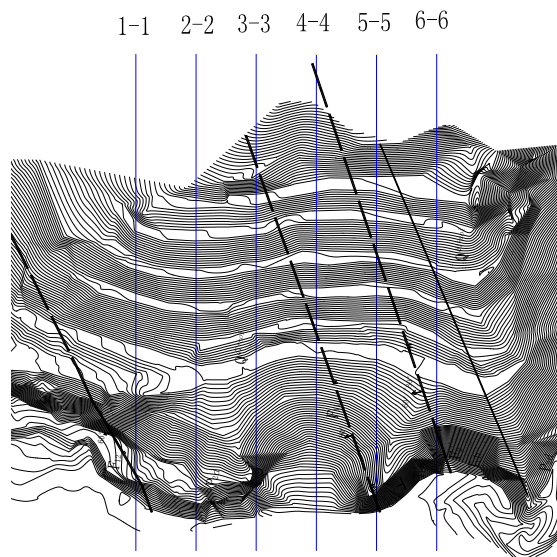


图2 三维极限平衡计算范围图

#### 2. 计算工况

针对当前边坡变形体, 分别拟定了如下八种计

算工况,见表 1。

表 1 八种计算工况

工况	类型
工况 1	天然状况(水库蓄水前,现状)
工况 2	天然状况(水库蓄水前)+遭遇暴雨
工况 3	天然状况(水库蓄水前)+地震
工况 4	水库蓄水后,正常蓄水位(3090.00m)
工况 5	水库运行期,水位从正常蓄水位(3090.00m)降到死水位(3037.00m)
工况 6	水库蓄水后,校核洪水工况(0.05%频率洪水)
工况 7	水库蓄水后,设计洪水工况(1%频率洪水)+遭遇暴雨
工况 8	正常蓄水位(3090.00m)+地震

分析暴雨工况时,假定地下水柱高为条柱高度的 20%。地震工况计算中水平向加速度按照要求设定为 0.15g,地震的分布系数设定为 0.25。

### 3. 滑动模式

滑动模式一:假定 3083m 高程平台作为剪出口的局部滑动破坏模式,采用圆弧滑动搜索其最危险滑动面;

滑动模式二:整体滑动破坏模式,采用圆弧滑动在覆盖层内搜索其最危险滑动面;

## 四、边坡整体稳定性分析

### (一)滑动模式一

该滑动模式主要以 3 083m 高程平台作为剪出口。该滑块的方量为 33.8 万方,潜在滑块的空间位置、滑裂面的空间展布及滑块体型图分别如图 3~5 所示。

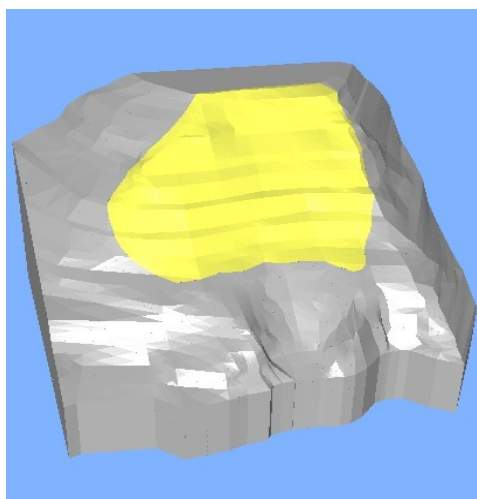


图 3 滑块在边坡上的位置示意图

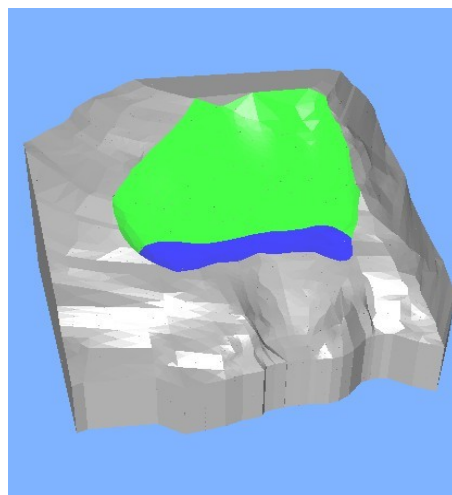


图 4 滑块滑裂面构成示意图

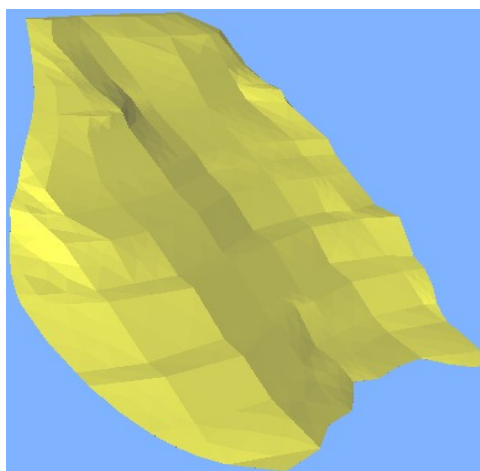


图 5 滑块体型图

根据三维极限平衡分析,得到该滑动模式在不同工况下的稳定性安全系数如表 2 所示。

表 2 滑动模式一的稳定性安全系数

滑动模式	蓄水前工况			蓄水后工况				
	1	2	3	4	5	6	7	8
局部滑动	1.53	1.29	1.42	1.47	1.45	1.47	1.28	1.34

由表 2 可知对于滑动模式一,蓄水前边坡安全系数在工况 1~3 分别为 1.53、1.29 及 1.40。表明边坡在现状条件下较稳定,这与实际情况相符合。

当水库蓄水至正常蓄水位或校核洪水位时(即工况 4 和 6),边坡安全系数分别为 1.47。水库发生库水骤降时(工况 5),边坡安全系数为 1.45,由于该滑动模式剪出口高程位于 3 083 平台,故库水骤降对其

影响有限,安全系数变化不显著。

当水库发生设计洪水并遭遇暴雨时(工况7),地下水位线抬高,导致边坡土体强度参数发生弱化,同时边坡安全系数降低为1.28,使得边坡的抗滑力变小。

当水库在正常蓄水位附近运行并遭遇地震时(工况8),由于水平地震力的作用,导致边坡滑动力变大,边坡安全系数降低为1.34,抗滑力变小。

## (二)滑动模式二

该滑动模式为整体滑动模式,该滑块的方量为66.2万方,空间位置、滑裂面的空间展布及滑块体型图分别如图6~8所示。

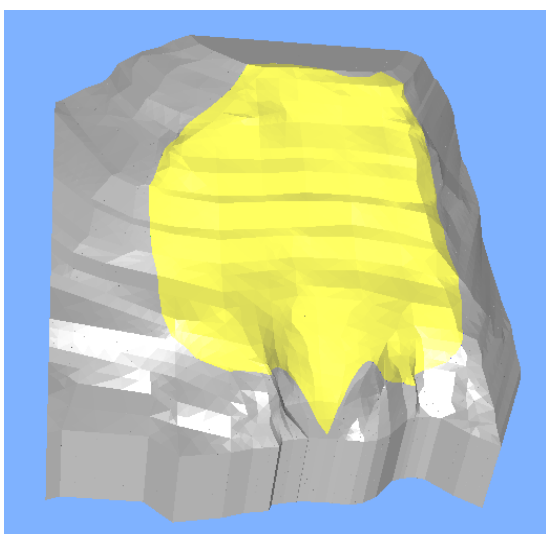


图6 滑块在边坡上的位置示意图

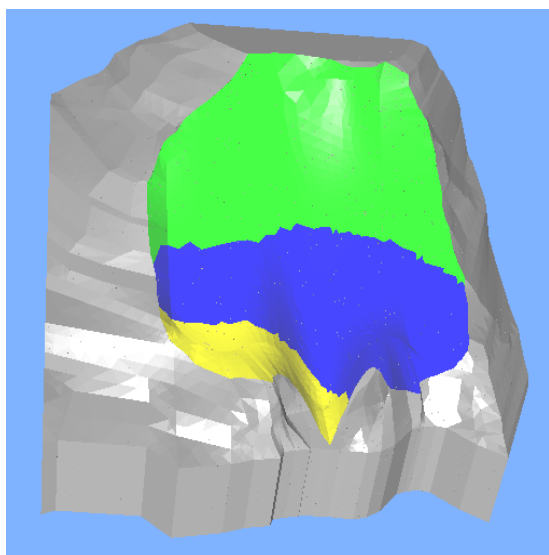


图7 滑块滑裂面构成示意图



图8 滑块体型图

根据三维极限平衡分析,得到该滑动模式下的稳定性安全系数见表3所示。

表3 滑动模式二的稳定性安全系数

滑动模式	蓄水前工况			蓄水后工况				
	1	2	3	4	5	6	7	8
整体滑动	1.49	1.25	1.41	1.28	1.12	1.28	1.18	1.19

对于滑动模式二,由表3可知,蓄水前边坡在工况1~3的安全系数分别为1.49、1.25及1.41。这表明边坡在现状条件下较稳定,与实际情况相符合。

当水库蓄水至正常蓄水位时(工况4),边坡安全系数为1.28。这说明水库蓄水后将削弱边坡的稳定性。这是由于库水的渗入,一方面弱化了土体的参数,另一方面使得下部土体的抗滑力减小,改变了边坡中下部的土体容重,从而导致边坡的稳定性降低。当水库在正常蓄水位附近运行并遭遇地震时(工况8),由于水平地震力的作用,边坡滑动力增加,边坡安全系数降为1.19。

当水库发生库水骤降时(工况5),边坡内部渗水无法在短时间内排出,导致边坡存在超孔隙水压力,边坡的稳定性变小,同时使得滑带中的有效应力及抗滑力变小了。经计算,此工况边坡安全系数为1.12,不能满足规范要求。因此,为了提高边坡在库水骤降时的稳定性,需要采取必要的加固措施。

## 五、结论

3D-SLOPE软件能够有效地结合三维地层信息系统和极限平衡分析法,运用三维地层信息系统的专业分析功能,采用极限平衡分析法表现形式,用实

际分析结合工程经验确定可能的滑裂面和滑体范围,对工程上可能的多个滑动方向进行计算,并自动搜索潜在最危险滑面及主滑方向,同时还考虑多种荷载及其组合,如自重、水压力、地震作用等。这种高质量的三维图形显示能力,能够全面反映边坡滑面的情况,在边坡工程稳定性评价与边坡设计中有着广阔的应用前景。

本文基于三维 Spencer 法,运用改进的条柱受力模型,采用 3D-SLOPE 软件计算出双鸡沟边坡在两种滑动破坏模式下的安全系数,基本满足规范要求,只有在第二种滑动破坏模式库水骤降时安全系数最小。对比局部和整体滑动模式的安全系数范围,可以为工程实践提供依据。

参考文献:

- [1] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚.边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J].岩土工程学报,2001,23(5):525-529.
- [2] 李同录,王艳霞,邓宏科.一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J].岩土工程学报,2003,25(5):611-614.
- [3] 朱大勇,钱七虎.三维边坡严格与准严格极限平衡解答及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1513-1528.
- [4] 张煜,姜清辉.滑坡体三维构造及稳定性分析[J].安全与环境学报,2006,6(1):42-45.
- [5] 姜清辉,王笑海,丰定祥,等.三维边坡稳定性极限平衡分析系统软件 SLOPE<sup>3D</sup> 的设计及应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1121-1125.
- [6] 张均锋,王思莹,祈涛,等.边坡稳定分析的三维 Spencer 法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3434-3439.
- [7] 麻官亮,邵玉刚.基于 Spencer 法的三维极限平衡边坡稳定性研究[J].水文地质工程地质,2016,43(3):118-123.

## Analysis on Slope Stability of Three Dimensional Limit Equilibrium Method under the Different Sliding Failure Modes

LIN Yan<sup>1</sup>, DONG Qing<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>

(1.School of Urban Construction, Anhui Radio and TV University, Hefei 230022, China;

2 .Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230001, China)

**Abstract:** Combined with two different slope sliding failure modes of Shuang Ji Gou and based on 3D Spencer method, the paper uses the 3D - SLOPE software to analyze slope stability. In view of the slope deformation, eight kinds of calculation cases are worked out respectively. According to the three dimensional limit equilibrium analysis, the two sliding modes under different conditions are obtained. However, only one kind of sliding mode can't meet the requirement of slope stability when the reservoir water drops, the others all can meet the specification requirements. Therefore, the results above can provide the basis for engineering practice.

**Key words:** three dimensional limit equilibrium; slope stability; 3D-SLOPE

[责任编辑 李潜生]