

# 地下水位对雾江滑坡体稳定性的影响

陈勋辉<sup>1,2</sup>, 黄耀英<sup>1</sup>, 李春光<sup>3</sup>, 张如强<sup>4</sup>, 左全裕<sup>4</sup>, 林莉<sup>2</sup>

(1.三峡大学 水利与环境学院 湖北 宜昌 443002; 2.黄河上游水电开发有限责任公司大坝管理中心 西宁 810008;  
3.中国科学院 武汉岩土力学研究所 武汉 430071; 4.湖南澧天河工程建设投资有限责任公司 湖南 永州 425500)

**摘要:**边坡稳定安全系数受多方面因素的影响,其中地下水位线的不同处理方式对边坡稳定的影响较大。由于实际工程问题的复杂性,一般需要基于某种假定获得新的地下水位线。基于极限平衡理论,结合雾江滑坡体工程,对比分析2种地下水位线处理方式对安全系数的影响,同时探讨了不同水位下的临界地下水位。分析表明:假定库水位与原始地下水位水平直接相连,古滑坡安全系数随着水位上升呈现先缓慢增加后逐渐减小的趋势;而假定考虑滑坡体内地下水位变化,古滑坡安全系数随着蓄水位的上升呈现逐渐减小的趋势,即考虑库水位引起地下水位变化后,安全系数有一定的降低,安全系数偏于保守;并且不同库水位都存在一个临界地下水位比例系数,且比例系数位于0~1之间。

**关键词:**地下水位线;安全系数;滑坡体;稳定性分析;临界地下水位

中图分类号:P642.2 文献标志码:A 文章编号:1001-5485(2017)01-0104-05

## 1 研究背景

地下水对边坡的影响主要体现在两方面:一是导致边坡岩土体重度增加;二是水的入渗导致岩土体的含水量增加,进而导致岩土体强度下降<sup>[1-3]</sup>。特别是在水库蓄水运行后,由于库水位的升高,库岸的水文地质条件发生了很大的改变,其岩土物理力学性质出现恶化,表现为岩土体的抗剪强度降低,浮托力增大,原处于极限平衡状态或接近极限平衡状态的库岸边坡往往发生失稳破坏<sup>[4-6]</sup>。地下水对边坡的稳定有着重要的影响,由于实际工程问题的复杂性,水库蓄水后的地下水位具有不确定性,蓄水后,基于不同假设获得的地下水位对边坡的安全影响很大。时卫民等<sup>[7]</sup>根据布西涅斯克非稳定渗流微分方程,假定蓄水后含水层的厚度不变,采用多项式拟合的方法得到了库水位等速下降时坡体内地下水位线的简化计算公式。吴琼等<sup>[8]</sup>假定稳定渗流情况下的浸润线为非稳定渗流的初始值,推导出库水位上升联合降雨作用下该模型中浸润线的近似解析解。但由于参数确定困难,上述方法在实际工程应用上仍有一定困难。本文针对雾江滑坡体工程,

基于极限平衡理论的边坡稳定性分析软件 Geo-Slope,采用2种不同假设获得的地下水位线,建立边坡分析模型,并分析其安全系数,寻找各自的规律,依据此规律指导该边坡的治理,以及为类似工程提供参考。

## 2 地下水位线计算原理

地下水作为地质环境内最活跃的成分,对岩土体力学性质的影响不可忽视。地下水位的变化导致土坡中潜在滑裂面上土的有效应力分布变化,如在深基坑开挖并点降水过程中,随着坑底水位的降低,地下水位线会形成漏斗状,浸润线的形状决定滑坡体中有效应力的分布。当土的渗透性较好时,如在砂土中地下水位线相对平缓;在黏性土中,由于渗透性较差,地下水位线相对曲率较大<sup>[9]</sup>。这种确定方法具有一定的随意性。由于实际工程问题的复杂性,水库蓄水后的地下水位具有不确定性。许多文献里都基于不同假定提出了各自的地下水位公式,在这里不再赘述。以下主要介绍工程中2种地下水位近似处理方式的基本原理。

水位上升,滑坡体内地下水位将随之变化。蓄

收稿日期:2015-11-02;修回日期:2015-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51209124)

作者简介:陈勋辉(1989-)男,湖北丹江口人,硕士研究生,主要从事大坝安全监控方面的研究,(电话)18697290067(电子信箱)xunhuichen@sina.com。

通讯作者:黄耀英(1977-)男,湖南郴州人,教授,博士,主要从事水工结构安全监控及数值计算方面的研究,(电话)13997662901(电子信箱)huangyaoying@sohu.com。

水前,可以通过测压孔水位观测获得初始地下水位,蓄水后,由于尚没有实测资料以及实际工程问题的复杂性,一般需要基于某种假定获得新的地下水位线,目前一般采用如下 2 种近似处理方式:①假设库水位水平延伸至滑坡体内,与坡内地下水位相交;②假设考虑滑坡体内地下水位变化。2 种处理方式的原理示意图如图 1 所示。

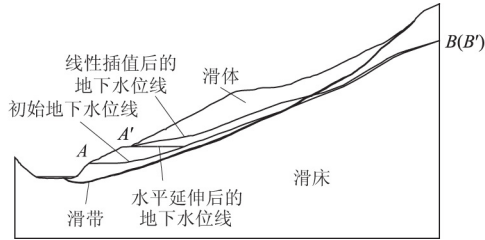


图 1 2 种处理方式的原理示意图

Fig.1 Principle diagram of two processing methods

图中 A 表示初始地下水位与坡面的交点, A' 表示新水位与坡面的交点。一般情况下,当库水位上升或下降时,库区远处的水位是相对稳定的(即  $B \approx B'$ ) ,再加上库水位的高程是已知的,因此可以利用这一特性,通过线性插值的方法来得到不同库水位的地下水水面线。曲线 AB 表示初始地下水位线,曲线 A'B' 表示插值后的地下水位线。

其坐标变换规律是使得 A'B' 线与 AB 线相似,且 A 与 A' 对应, B 与 B' 对应。已知坐标  $A(x_A, y_A)$ ,  $B(x_B, y_B)$ ,  $A'(x_{A'}, y_{A'})$ ,  $B'(x_{B'}, y_{B'})$ , 其对应于 AB 上的任一点坐标为  $(x, y)$ , 则 A'B' 上对应点  $(x', y')$  处的坐标为:

$$x' = x_{A'} + \frac{x - x_A}{x_B - x_A} (x_{B'} - x_{A'}) \quad (1)$$

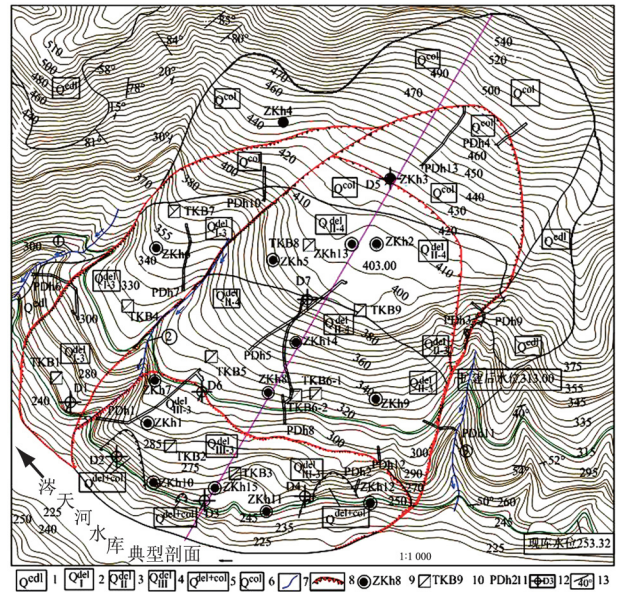
$$y' = y_{A'} + \frac{y - y_A}{y_B - y_A} (y_{B'} - y_{A'}) \quad (2)$$

### 3 实例分析

#### 3.1 工程概况

雾江滑坡体距水库扩建工程的推荐坝轴线约 590 m,上游边界距坝体约 1 000 m,是一个典型的古滑坡。滑坡区地形呈台阶状,可见 2 级台阶,一级台阶高程 300~310 m,宽 50~70 m,长约 350 m,前缘边坡坡角  $26^\circ \sim 33^\circ$ ,局部达  $45^\circ$ ;二级台阶高程 400~410 m,宽 40~100 m,长约 250 m。前缘山坡坡角  $22^\circ \sim 28^\circ$ ;滑坡后缘壁分布高程为 510~700 m,地形坡角  $42^\circ \sim 53^\circ$ ,沿后缘壁崩塌现象显著。滑坡区基岩为寒武系( $\epsilon$ )的浅变质岩和泥盆系(D)的碎屑岩,两者

呈角度不整合接触;第四系松散堆积有滑坡堆积、崩塌堆积和残坡积。滑坡区发育 3 条冲沟,延伸较长,切割较深,其中①号冲沟位于滑坡体下游边界;②号冲沟位于滑坡体中部;③号冲沟位于滑坡体上游边界。根据地质勘察及观测资料,雾江滑坡体目前仍处于缓慢蠕滑状态,其平面示意图如图 2 所示。



注: 1—残坡积堆积物(碎石、块石黏土); 2—第四系第一期地滑堆积物(含少量壤土的碎块石及变形岩体,下同); 3—第四系第二期地滑堆积物; 4—第四系第三期地滑堆积物; 5—近期崩滑堆积物; 6—崩积堆积碎块石; 7—冲沟编号,图上含有 3 条冲沟; 8—滑坡体边界及滑坡体分期界限; 9—钻孔编号; 10—取样试坑及其编号; 11—平硐编号; 12—表部变形观测点及其编号; 13—岩层产状。

图 2 雾江滑坡平面示意图

Fig.2 Schematic plan of Wujiang landslide

水位上升,滑坡体内地下水位将随之变化,将会对边坡的稳定带来影响。为此,以该滑坡体为例,对不同地下水位近似处理方式下的古滑带整体稳定性进行分析。

#### 3.2 计算模型及参数

##### 3.2.1 计算模型

对该滑坡体严格按照地质材料分区,建立几何模型,初始水位 253 m 时的边坡滑动面如图 3 所示。

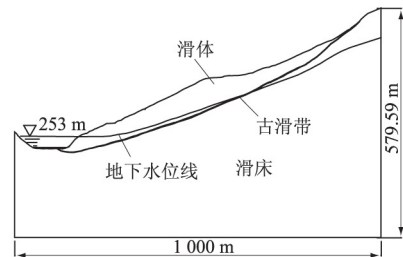


图 3 初始地下水位条件下的边坡滑动面示意图

Fig.3 Sketch of slip surfaces in the presence of initial groundwater level

### 3.2.2 计算参数

取滑带土样进行土工试验,以纵 2 剖面为代表性计算剖面,采用滑面中剪试验屈服强度平均值: $f_{水上} = 0.27, c_{水上} = 12.7 \text{ kPa}; f_{水下} = 0.23, c_{水下} = 8.8 \text{ kPa}$ 。根据规程公式等  $F_s$  法计算的现状(现库水位 253 m)稳定系数仅为 0.67,  $< 0.95$ ,表明滑坡处于整体滑动破坏阶段,这与滑坡现状处于缓慢的蠕滑变形状态不吻合,同时也说明所选取的计算参数偏小。因此,按规程要求采用反分析计算,假定目前滑坡体处于极限平衡状态,稳定系数为 1.0,选取平行于滑动方向的典型剖面为计算剖面,水下强度与水上强度的折减系数  $\lambda = 0.84$ ,采用现水库水位(253 m)通过等安全系数法进行反算,反演获得了雾江滑坡体的强度参数,如表 1 所示。

表 1 雾江滑坡体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of Wujiang landslide body

岩土结构类型	状态	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗剪强度参数	
			摩擦系数	凝聚力/kPa
滑坡体	水上	21.70	0.51	30.66
	水下	22.10	0.46	25.55
滑动面(带)	水上	21.90	0.39	24.53
	水下	22.30	0.34	20.44
后缘崩塌碎块石与基岩接触面	水上	—	0.55	15.0
河床含泥砂砾石	水下	22.10	0.42	5.00

(1) 工况设计。工况 1: 假设库水位水平延伸至滑坡体内,与坡内地下水位相交;工况 2: 假设考虑滑坡体内地下水位变化。库水位上升时,不考虑孔隙水的滞后作用,即假定坡体中的水面与库水位同步上升。

(2) 计算软件。Geo-Studio 是一套专业、高效而且功能强大的适用于岩土工程和岩土环境模拟计算的仿真软件,它包含多个模块。其中,Slope/w 模块作为分析计算岩土工程边坡滑移面和安全系数的主流软件,能对边坡问题中的任意指定滑移面的岩土边坡进行分析计算。

### 3.3 蓄水后不同地下水位近似处理方式对比

#### 3.3.1 不同工况下的安全系数对比

初始状态时,水位为 253 m,边坡前部的水位每次抬高 10 m 进行一次极限平衡分析,得到的边坡稳定安全系数,即计算边坡前部水位分别为 253, 263, 273, 283, 293, 303, 313 m 时的安全系数,2 种不同地下水位近似处理方式如图 4 所示。对于 2 种不同工况,用不同的极限平衡分析方法(瑞典条分法、M-P 法)计算每个水位对应下的安全系数,得到的安全系数变化规律如图 5 所示。

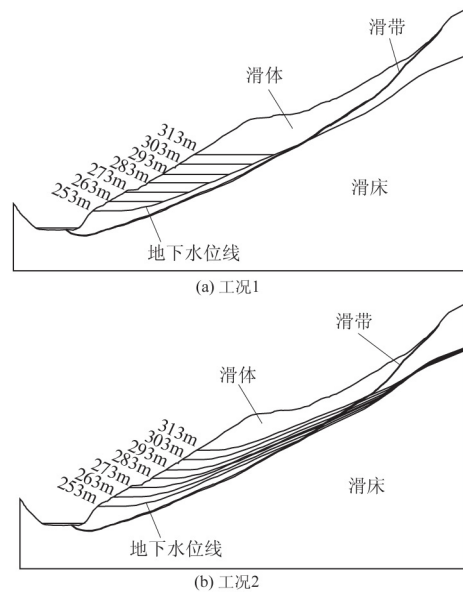


图 4 各工况不同库水位下的地下水位示意图

Fig.4 Groundwater lines in the presence of different reservoir water levels in different cases

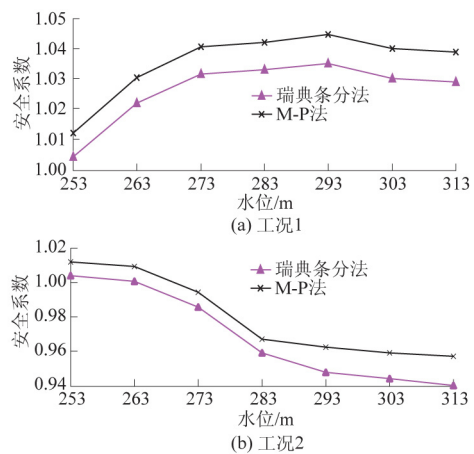


图 5 各工况不同库水位下的安全系数

Fig.5 Safety factors in the presence of different reservoir water levels in different cases

对图 5(a) 和图 5(b) 横向比较可知:

(1) 假定库水位与原始地下水位水平直接相连,古滑带安全系数随着水位上升呈现先缓慢增加后逐渐减小的趋势;考虑库水位变化,古滑带整体安全系数随着蓄水位的增加呈现逐渐减小的趋势。以 M-P 法为例,对于工况 1,初始水位 253 m 时,安全系数为 1.012,随着蓄水位的增加,在蓄水位为 293 m 时达到极大值,安全系数变为 1.042,增加了 2.9%,在蓄水位为 293 m 以后,安全系数又逐渐减小;对于工况 2,初始水位 253 m 时,安全系数为 1.012,随着蓄水位的增加,在蓄水位为 293 m 时安全系数变为 0.962,减少了 4.9%。

(2) 假定库水位与原始地下水位水平直接相连,安全系数会有一定的提高;考虑库水位引起地下水位变化后,安全系数有一定的降低。以 M-P 法为

例,如考虑库水位引起地下水位变化,相对于初始水位 253 m,当水位上升到 313 m 时,安全系数从 1.013 降低为 0.949,降低了 6.3%;而如假定库水位与原始地下水位水平直接相连,得到的安全系数为 1.039,提高了 2.6%,即随着库水位的上升,安全系数是提高了,得到的结果偏于危险。

对图 5(a) 和图 5(b) 纵向比较可知:

瑞典条分法、M-P 法所得的安全系数虽然有些偏差,但整体变化趋势一致,不同方法计算结果偏差的原因是由于不同计算方法的假定条件不一致导致的,如瑞典条分法由于在对土条受力分析时不考虑条间应力,所以计算所得的稳定系数  $K$  值偏小,M-P 法计算的结果一般要大于瑞典条分法。

### 3.3.2 不同水位下的抗剪力合力、剪切力合力比较

为了进一步分析安全系数的变化规律的原因,对不同蓄水位下的抗剪力合力与剪切力合力进行对比。以 M-P 法为例,工况 1 与工况 2 条件下的抗剪力合力与剪切力合力值分别见表 2、表 3。

表 2 工况 1 条件下的抗剪力合力与剪切力合力

Table 2 Composite forces of shearing resistance and shearing force in case 1

水位 / m	抗剪力 / $10^5$ kN	剪切力 / $10^5$ kN	水位 / m	抗剪力 / $10^5$ kN	剪切力 / $10^5$ kN
253.30	2.629	2.598	293.00	2.626	2.510
263.00	2.628	2.550	303.00	2.627	2.526
273.00	2.624	2.521	313.00	2.628	2.539
283.00	2.625	2.515			

表 3 工况 2 条件下的抗剪力合力与剪切力合力

Table 3 Composite forces of shearing resistance and shearing force in case 2

水位 / m	抗剪力 / $10^5$ kN	剪切力 / $10^5$ kN	水位 / m	抗剪力 / $10^5$ kN	剪切力 / $10^5$ kN
253.30	2.629	2.598	293.00	2.354	2.446
263.00	2.550	2.526	303.00	2.276	2.373
273.00	2.453	2.467	313.00	2.151	2.248
283.00	2.400	2.452			

由表 2、表 3 可知:

(1) 工况 1 条件下,不同水位下的抗剪力合力变化很小,保持在  $2.62 \times 10^5$  kN 左右,而剪切力合力随着水位的上升先减小后增大。条分法的基本原理是极限平衡理论,计算时将滑动体分成一条一条的土块,在计算安全系数  $K$  时,用抗剪力合力比上滑动面剪切力合力作为  $K$  的值。因此,抗剪力合力不变,剪切力合力先减小后增大,安全系数会呈现先增大后减小的趋势。

(2) 工况 2 条件下,不同水位下的抗剪力合力、剪切力合力均随着水位的上升呈现逐渐减小的趋势。但抗滑力下降对边坡抗滑力的影响程度大于其下滑力下降对边坡下滑力的影响程度,从而导致边坡的稳

定系数下降。如:当水位为 253 m 时,抗剪力合力为  $2.629 \times 10^5$  kN,剪切力合力为  $2.598 \times 10^5$  kN,当水位为 273 m 时抗剪力合力变为  $2.453 \times 10^5$  kN,剪切力合力变为  $2.467 \times 10^5$  kN,抗剪力合力减少了 3.9%,剪切力合力减少了 2.3%,安全系数从原来的 1.012 下降到 0.994。

### 3.4 不同库水位对应的临界地下水位

根据上述结论可知,与初始水位下的安全系数相比较,假定库水位与原始地下水位水平直接相连,安全系数会有一些的提高;考虑库水位引起地下水位变化后,安全系数有一定的降低。可以进一步设想,当水位升高到某一水位,是否存在某一介于以上两者之间的地下水位线,使得此时计算的安全系数与初始水位时的安全系数一样?

为此,尝试对线性插值方法做一点改变,其具体做法为:公式(1)不变,对于公式(2)采取分段函数法,即

$$y'' = \begin{cases} y_0 + \alpha(y' - y_0), & x_A \leq x'' \leq x_0; \\ y + \alpha(y' - y), & x_0 \leq x'' \leq 1000. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $x''$ 、 $y''$  为新插值函数的横、纵坐标;  $x_0$ 、 $y_0$  为假定库水位与原始地下水位水平直接相连时的交点横、纵坐标;  $y$  为线性插值函数的纵坐标;  $\alpha$  为比例系数。

多次改变系数  $\alpha$ ,直到计算的安全系数与初始水位时的安全系数一样,系数为  $\alpha$  时对应的地下水位规定为临界地下水位。新插值函数下的地下水位线如图 6 所示。

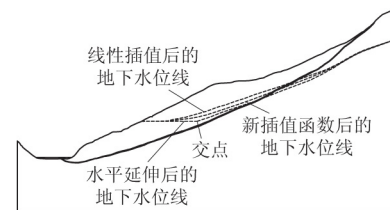


图 6 新插值函数下的地下水位线

Fig.6 Groundwater lines in the presence of a new interpolation function

与前面步骤类似,边坡前部的水位每次抬高 10 m 时进行一次极限平衡分析,在每次线性差值时,多次改变系数  $\alpha$  直到得到的安全系数与初始水位下的安全系数相同。水位分别为 253, 263, 273, 283, 293, 303 和 313 m 时不同比例系数下的安全系数如图 7 所示。由图 7 可知: ①不同水位都存在一个临界地下水位比例系数  $\alpha$ ,且  $\alpha$  位于 0~1 之间;例如,当水位为 263 m 时的临界地下水位比例系数为 0.97; ②对于某一水位来说,用新插值函数得到的地下水位线计算出的安全系数位于工况 1、工况 2 得出的安全系数之间,且安全系数随着  $\alpha$  的增大而减小。

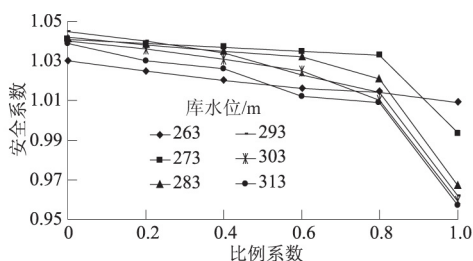


图7 不同库水位比例系数与安全系数的关系

Fig.7 Relationship between safety factor and proportionality factor under different reservoir water levels

## 4 结论

(1) 假定库水位与原始地下水位水平直接相连, 扩建后古滑带上的抗剪力合力变化很小, 而剪切力合力随着水位的上升先减小后增大, 故安全系数随着水位上升呈现先缓慢增加后逐渐减小的趋势。

(2) 考虑库水位变化, 古滑带的抗剪力合力、剪切力合力均随着水位的上升呈现逐渐减小的趋势, 但抗滑力下降对边坡抗滑力的影响程度大于其下滑力下降对边坡下滑力的影响程度, 故安全系数随着蓄水位的增加呈现逐渐减小的趋势。

(3) 假定库水位与原始地下水位水平直接相连, 安全系数会有一定的提高; 考虑库水位引起地下水位变化后, 安全系数有一定的降低, 安全系数偏于

保守。

(4) 不同水位都存在一个临界地下水位比例系数, 且比例系数  $\alpha$  位于 0~1 之间, 对于某一水位来说, 安全系数随着  $\alpha$  的增大而减小。

## 参考文献:

- [1] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 769-773.
- [2] 黄耀英, 沈振中, 包腾飞. 稳定渗流作用下圆弧滑动土坡稳定分析的代替法改进[J]. 力学与实践, 2014, 36(3): 285-287, 293.
- [3] 谢罗峰, 段祥宝. 非稳定渗流作用下边坡稳定性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 31-34.
- [4] 刘 鸿, 杨 涛. 考虑雾化雨条件下边坡的稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 47-52, 56.
- [5] 郭志华, 周创兵, 盛 谦, 等. 库水位变化对边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(增2): 29-32.
- [6] 袁 闻, 徐 青, 等. 边坡稳定分析的三维极限平衡法及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 56-61, 84.
- [7] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 76-80.
- [8] 吴 琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3025-3031.
- [9] 张卫民, 陈兰云. 地下水位线对土坡稳定的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5319-5322.

(编辑: 刘运飞)

## Influence of Groundwater Level on Landslide Stability at Wujiang

CHEN Xun-hui<sup>1,2</sup>, HUANG Yao-ying<sup>1</sup>, LI Chun-guang<sup>3</sup>, ZHANG Ru-qiang<sup>4</sup>, ZUO Quan-yu<sup>4</sup>, LIN Li<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Dam Management Center of Yellow River Upstream Hydropower Development Co. Ltd., Xining 810008,

China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

4. Construction Investment Limited Liability Company for Hunan Centianhe Project, Yongzhou 425500, China)

**Abstract:** The factor of slope's stability safety is influenced by various factors, among which groundwater level processed by different methods has great influence on the stability of slope. Due to the complexity of actual engineering problems, we generally need to obtain new groundwater level based on some assumptions. According to limit equilibrium theory, we compared and analyzed the influences of two different methods of processing groundwater line on the safety factor, and discussed the critical groundwater level corresponding to different reservoir water levels. An ancient landslide at Wujiang was taken as a case study. Result shows that 1) under the assumption that the reservoir water level is directly connected with the original groundwater level, the safety factor of landslide increases slowly and then decreases gradually with water level rising; 2) in consideration of groundwater level fluctuation, the safety factor of landslide tends to decrease with the increase of storage water level, indicating that the safety factor is conservative; 3) the factor of proportionality of critical groundwater level in the presence of different reservoir water level is between 0 and 1.

**Key words:** groundwater level; safety factor; landslide body; stability analysis; critical groundwater level