

# 库水位变化对库岸边坡稳定性的影响

夏 麾<sup>1</sup> 刘金龙<sup>2</sup>

(1. 无锡商业职业技术学院, 江苏无锡 214153; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071)

**【摘 要】** 在假定坡体孔隙水水位为水平线且不考虑渗透作用影响的基础上, 基于极限平衡法考察了水位上升及下降的快慢对边坡安全系数的影响。对比计算表明: 在水位缓慢变化即坡体内外水位线等高的条件下, 边坡的安全系数随着水位坡高比的增大先略减小后急剧增大, 且在水位坡高比为 0.3 处取得最小值, 在边坡完全淹没于水中时取得最大值。当边坡完全淹没于水中后, 水位高于坡顶的多少对边坡安全系数没有影响; 在水位骤降或陡升条件下, 相同库水位对应的边坡安全系数基本上均小于水位缓慢变化情况下的安全系数, 故工程实际中无论是排水还是蓄水, 都应尽量保持水位缓慢变化, 这样才能使边坡处于较安全的状态。

**【关键词】** 边坡稳定分析; 水位变化; 安全系数

**【中图分类号】** TU 413.62

## The Influence of Water Level Fluctuation on the Bank Slope Stability

Xia Hui<sup>1</sup> Liu Jinlong<sup>2</sup>

(1. Wuxi Institute of Commerce, Wuxi Jiangsu 214153 China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071 China)

**【Abstract】** Based on assumption of the pore water level is horizontal line and no seepage occurred in the slope, the influence of water-level fluctuation on stability of slope is presented through limit equilibrium method. It is shown that the factor of safety (FOS) of slope changes from slow decrease to rapid increase with water level slow raise, which get minimum value when ratio of water level-height of slope at 0.3, on the contrary, which get maximal value when water level as height as slope. There is no influence on FOS when the water level higher than slope. Further more, the FOS became less at water level rapid drawdown or rapid raise up than slow fluctuation. In order to avoid failure of slope, it is advised that water level fluctuated as slowly as human could controlled.

**【Key Words】** slope stability analysis; water level fluctuation; safety factor of slope stability

### 0 引 言

水库、河流等水位的变化对土石坝及边坡的稳定性有着重要的影响。水位上升时, 边坡浸水部分的土体由于浸泡作用导致抗剪强度下降, 从而可能诱发边坡失稳; 水位下降时, 一方面坡底的浮托力减小, 另一方面由于坡体内孔隙水来不及排出而使坡体水位高于库水位, 由此产生的渗流作用使潜在滑动面的抗滑能力降低, 也可能诱发边坡失稳。由于水位变化或雨水作用诱发边坡失稳的实例数不胜数, 因此有必要探讨不同水位的高低及不同水位变化的速率对边坡稳定性的影响。

Morgenstern 在不考虑孔压消散的假定基础上, 利用极限平衡法探讨了库水位变化对均质边坡安全

系数的影响。分析表明: 边坡安全系数随着库水位的上升而增大<sup>[1]</sup>。随后 Desai<sup>[2]</sup>和 Cousins<sup>[3]</sup>基于极限平衡法在考虑渗透作用的影响下也对该问题进行了深入探讨。近年来, 有限元强度折减法在边坡稳定性分析中逐渐被受到重视。Griffiths 和 Lane<sup>[4,5]</sup>基于自己开发的有限元软件, 利用强度折减法分析了水位变化对边坡安全系数的影响。结果表明: 边坡安全系数随着库水位的增加呈现先变小后变大的变化趋势。但 Griffiths 和 Lane<sup>[4,5]</sup>仅探讨了坡体内浸润线与库水位等高情况下的水位变化与安全系数的关系, 没有探讨库水位变化快慢对边坡安全系数的影响。

本文采用加拿大的边坡稳定性分析程序 SLOP

E/W,探讨了库水位上升和下降的不同速率对边坡安全系数的影响,为实际工程中边坡的治理提供参考。

### 1 水位缓慢变化对安全系数的影响

水位缓慢变化是指有足够的时间让孔隙水调整高度而与库水位持平,即不考虑坡体内孔隙水或坡外库水渗透的影响。现针对一均质土坡进行分析,其底部完全固定,左侧为水平固定而竖向滑动的边界条件。参数  $c$ 、 $\varphi$  采用有效应力强度参数:有效粘聚力  $c' = 10 \text{ kPa}$ 、有效内摩擦角  $\varphi' = 20^\circ$ ,重度取  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 。一般说,土体的强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值随着含水量的增加而降低,若孔隙水位以上的土体也采用有效应力强度参数,这种做法降低了高于水位以上土体的实际抗剪强度,因而其结果是保守即偏于安全的。该边坡的尺寸及坡体内水位与库外水的关系见图 1。

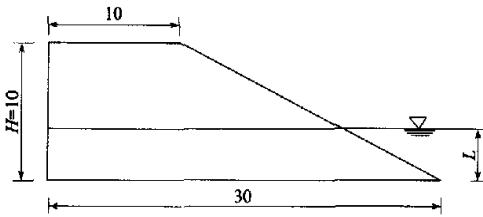


图 1 边坡尺寸及水位示意图(单位:m)

当坡体内孔隙水高度与坡外库水位持平时,坡外库水由于自重产生的水压力已自动和坡体内孔隙水压力相平衡,即不需要再将坡外水压力加载到土骨架上。在认识到坡外库水压力不需加载到土骨架的基础上,可以设计两种计算模型用来分析水位缓慢变化对边坡安全系数的影响(见图 2)。图 2 中 MN 为浸润线也即库水位线,材料 A 和材料 B 均采用相同的有效应力强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$  值,但材料 B 采用有效重度  $\gamma' = 10.2 \text{ kN/m}^3$  进行计算。

经过大量试算表明,用图 2(a)所示的计算模型得不到文献[1~5]中的大致规律,而采用图 2(b)的计算模型基本上可以验证这些规律。事实上,图 2(a)中采用浸润线后,计算软件会按照一定的算法减小浸润线以下土体的强度参数数值,这对于已假定采用有效应力强度参数的土体来说是不应该的,故图 2(a)所示的计算模型适合于采用总应力强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值的分析计算。图 2(b)中的计算模型抓住了采用有效应力强度参数后粘聚力和内摩擦角不受孔隙水影响且水位以下土体重度减小的主要特征,因而其适合于本文的计算条件。

除遇到数值分析困难情况外,用简化 Bishop 法进行边坡稳定性分析得到的安全系数在一般情况下是较精确的<sup>[6,7]</sup>,故本文的极限平衡法均采用简化 Bishop 法。利用图 2(b)的计算模型基于简化 Bishop 法得到的边坡安全系数与水位变化之间的关系曲线见图 3。

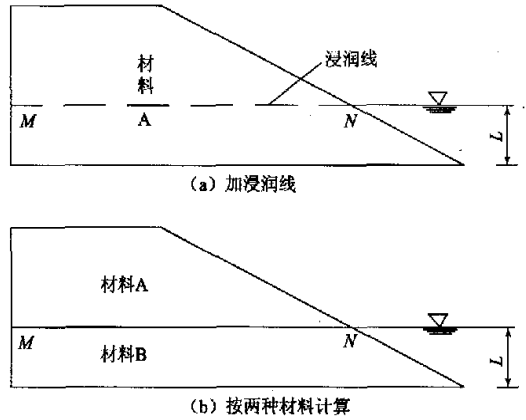


图 2 考虑水影响的不同计算模型

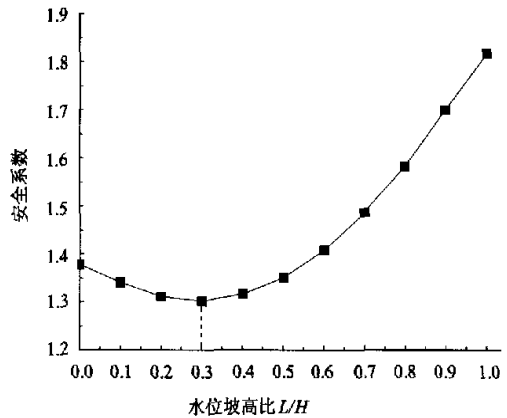


图 3 水位缓慢变化条件下边坡安全系数与水位间的关系

由图 3 可知,水位缓慢变化条件下边坡的安全系数随着水位(从坡底开始计算)坡高比的增大先减小后增大,且在水位坡高比为 0.3 时取得最小值,这与 Griffiths 和 Lane 的有限元计算结论<sup>[4,5]</sup>相吻合。早期(1963 年)Morgenstern 利用 Bishop 法得到了水位缓慢变化条件下边坡的安全系数随着水位坡高比的增大而逐渐增大的结论<sup>[1]</sup>,Griffiths 和 Lane 认为这是采用了边坡滑动圆弧面与坡底相切的假定的缘故<sup>[4,5]</sup>。但本文采用简化 Bishop 法(也假定边坡滑动圆弧面与坡底相切)也得到了与 Griffiths 和 Lane 有限元计算相同的结论,说明采用边坡滑动圆弧面

与坡底相切的假定不一定会导致计算失真,相反可能是 Morgenstern 当年采用的极限平衡法分析软件相对于现在来说还不成熟的缘故。

一般认为,边坡安全系数在水位坡高比为 0.3 时取得最小值的解释<sup>[4,5]</sup>是:在水位上升的初始阶段( $L/H < 0.3$ ),土体抗剪强度因含水量增加而减小的不利影响要比土体因浸水受浮力作用使重量的减小的有利影响要大,故边坡安全系数降低;但当水位上升至  $L/H > 0.3$  后,土体因浸水后重量的减小有利影响大于土体抗剪强度减小的不利影响,从而边坡的整体安全系数反而提高。但对于已采用有效应力强度参数的情况下,还会出现这种边坡安全系数随着水位升高而先变小后增大的原因,还有待进一步深入探讨。

分析图 3 所示的关系曲线可知:水位的上涨并不一定使边坡的稳定性降低,在水位坡高比大于 0.3 后,边坡的安全系数随着水位的上涨而变大,并在边坡刚好完全淹没( $L/H = 1$ )的条件下边坡的稳定性系数最高。相反地,对于刚好完全淹没于水中( $L/H = 1$ )的边坡,当水位下降时,其安全系数将急剧减小,并在水位坡高比等于 0.3 处取得最小值。进一步分析知,当边坡完全淹没于水中( $L/H \geq 1$ )后,根据图 2(b)的计算模型可知,土体的强度参数均采用材料 B 的参数,故水位高于边坡坡顶的多少已经对边坡安全系数没有影响,这与 Griffiths 和 Lane 的有限元计算结论<sup>[4,5]</sup>取得了一致。

### 2 水位骤降对安全系数的影响

水位骤降是指因水位下降速度较快,边坡坡体内孔隙水来不及排出,而导致坡体水位高于库水位的情况。为了便于计算,假定边坡坡体内孔隙水水位为水平线,且不考虑孔隙水渗流的影响。水位快速下降情况下的计算简图见图 4,图中 EF 表示坡体内孔隙水水位,计算中假定 FK 段上无渗流发生。因坡体水位高于库水位,导致边坡 EFKG 内水的自重由土骨架来承担,故材料 C 的土体重度取值为  $\gamma = 29.8 \text{ kN/m}^3$ ,其粘聚力和内摩擦角参数则与材料 A、材料 B 相同。而 GK 线以下的土体内的孔隙水与库外水相通,故 GK 线以下的土体可采用材料 B 的参数进行模拟。

图 4 中 D 代表坡体内孔隙水水位与库水位的差距,若 D 值越大,说明水位下降速度越快。对照不同 D 值下的边坡安全系数即可了解不同水位下降速度对边坡安全系数的影响。用简化 Bishop 法求得的  $D = 1 \text{ m}$  和  $D = 2 \text{ m}$  情况下边坡安全系数与

水位缓慢下降情况下(相当于  $D = 0 \text{ m}$ )结果间的对比关系见图 5。

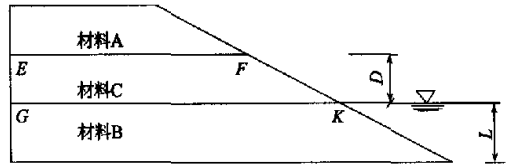


图 4 水位骤降时采用的计算模型

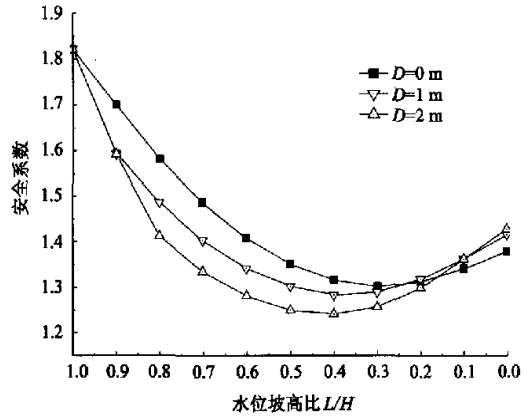


图 5 水位骤降速度对边坡安全系数的影响

从图 5 可以看出:边坡安全系数随着水位的下降先大幅度变小,达到最小值后又略有提高;当水位下降速率越大时,相同库水位对应的边坡安全系数基本上越小,边坡安全系数达到最小值时对应的水位越高,且安全系数最小值数值变小。由此可以看出:水位下降速率越大时,边坡越不稳定,故工程实际中尽量避免水位快速下降现象的发生。可以预测:当三峡水库遇到特殊情况(如战争等)需要快速泄水时,三峡库区一些不稳定边坡可能会由于水位骤降而导致滑坡的发生。

### 3 水位陡升对安全系数的影响

水位陡升是指因库水位上升速度较快,库外水还来不及渗透到边坡坡体内,而导致库水位高于坡体水位的情况。为了便于计算,同样假定边坡坡体内孔隙水水位为水平线,也不考虑库外水向坡体渗透的影响。水位快速上涨情况下的计算简图见图 6,图中 EF 表示坡体内孔隙水水位,KG 表示库水位高度,计算中假定 KF 段上无渗流发生。但由于库外水位高于坡体体内水位,库外水必然在边坡的水位差段上有水压力的作用,即在 KF 段上有线性水压力的作用, F 处的水压力大小为  $D\gamma_w$ 。

图 6 中 D 代表库水位与坡体内孔隙水水位的差距,若 D 值越大,说明水位下降速度越快。为了

区别于水位骤降时情况,  $D$  取负值, 其绝对值越大, 说明水位上升速率越快。

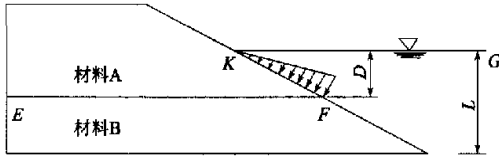


图6 水位陡升时一般情况下的计算模型

用简化 Bishop 法求得的  $D = -1$  m 和  $D = -2$  m 情况下边坡安全系数与水位缓慢上升情况下(相当于  $D = 0$  m)结果间的对比关系见图7。

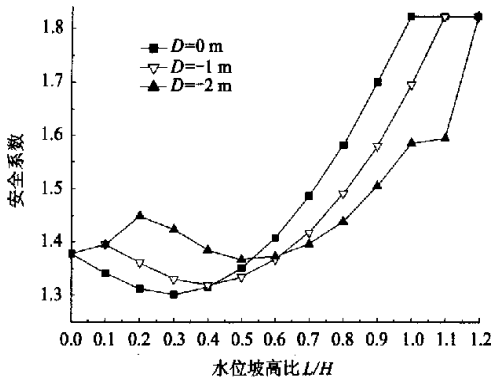


图7 水位陡升速度对边坡安全系数的影响

从图7可以看出:除边坡开始浸水的初始阶段外,边坡安全系数基本上符合随着水位的上涨先略减小后急剧增大的变化趋势;当水位上升速率越大时,相同库水位对应的边坡安全系数基本上越小,边坡安全系数达到最小值时对应的水位越高,且安全系数最小值数值略变大。

由此也可以看出:并不是水位上升速率越大边坡越稳定。为了使边坡尽可能的保持稳定,蓄水时先期速率可尽量大,到了一定程度后,即边坡安全系数达到最小值后,蓄水的速率又应该尽量慢。至于水位多高时边坡安全系数达到最小,应针对具体的边坡条件进行分析。

进一步对比分析图5与图7可知,除边坡坡底开始浸水的一小段范围外,在相同库水位情况下,水位快速上升或快速下降条件下的边坡安全系数均小于水位缓慢变化情况下的安全系数。即水位骤降陡升均不利于边坡的稳定,故工程实际中无论是排水还是蓄水,都应尽量保持水位缓慢变化,这样才能使边坡处于较安全的状态。

#### 4 结 论

在假定坡体内孔隙水水位线为水平线及不考虑

渗透作用的基础上,利用合理的计算简图,基于极限平衡法考察了水位变化快慢对边坡安全系数的影响,对比计算表明:

1) 水位缓慢变化即坡体内外水位线等高的条件下,边坡的安全系数随着水位坡高比的增大先略减小后急剧增大,且在水位坡高比为0.3时取得最小值。当边坡完全淹没于水中后,水位高于坡顶的多少对边坡安全系数没有影响。

2) 当水位下降速率越大时,相同库水位对应的边坡安全系数基本上越小,边坡安全系数达到最小值时对应的水位越高,且安全系数最小值数值也变小。故水位下降速率越大时,边坡越不稳定,工程实际中尽量避免水位快速下降现象的发生。

3) 当水位上升速率越大时,相同库水位对应的边坡安全系数也基本上越小,边坡安全系数达到最小值时对应的水位越高,且安全系数最小值数值略变大。为了使边坡尽可能地保持稳定,蓄水时先期速率可尽量大,直到边坡安全系数达到最小值后,蓄水的速率又应该尽量慢。

4) 从总体上来看,水位骤降陡升均不利于边坡的稳定,故工程实际中无论是排水还是蓄水,都应尽量保持水位缓慢变化,这样才能使边坡处于较安全的状态。

#### 参 考 文 献

- 1 Morgenstern N R. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. *Geotechnique*, 1963, 13:121~131
- 2 Desai C S. Drawdown analysis of slopes by numerical methods. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1977, 103(7):667~676
- 3 Cousins B F. Stability charts for simple earth slopes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1978, 104(2):267~279
- 4 Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 1999, 49(3):387~403
- 5 Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(5):443~450
- 6 Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1996, 122(7):577~596
- 7 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理、方法、程序. 北京:中国水利水电出版社, 2003. 72