

基于垂直条分法改进计算式的库岸滑坡滑速分析

黄锦林^{1 2} 钟志辉³ 张明飞⁴

(1. 广东省水利水电科学研究院 广东 广州 510630; 2. 广东省岩土工程技术研究中心 广东 广州 510630;
3. 武汉大学土木建筑工程学院 湖北 武汉 430072; 4. 华南理工大学土木与交通学院 广东 广州 510641)

摘 要: 在潘家铮山地滑坡垂直条分法滑速计算式的基础上, 考虑库水阻力及受水作用后底摩擦系数减小的影响, 推导出适合库岸滑坡滑速分析的垂直条分法改进计算式。利用该式, 分析了鹅公带古滑坡失稳工况下的滑动结果, 并比较了两种算法的差异。结果表明, 鹅公带古滑坡蓄水失稳滑动后的最大水平滑速约 8 m/s, 两种算法的结果有一定差异。垂直条分法改进计算式考虑了库岸滑坡滑动过程中受库水作用的影响, 计算结果更符合实际, 能提高库岸滑坡滑速计算精度。

关键词: 库岸滑坡; 滑速计算; 垂直条分法; 改进公式; 鹅公带古滑坡体

中图分类号: 642.22

文献标识码: A

下滑速度计算是滑坡分析中的一个难点。计算滑坡下滑速度最一般的方法是依据动能定理推求。滑坡下滑的过程中, 它的高势能释放会转化为动能, 滑坡滑动还要克服滑面的摩擦阻力做功, 根据动能定理, 即合外力对滑体所作的功等于滑体动能的改变量, 就可以很容易地求出滑坡下滑的速度。动能定理对于直线性滑动面是比较准确的, 但对于非直线性滑动面, 其误差较大, 实际的滑坡(特别是非岩质滑坡) 大部分都是非直线性滑动面; 另外, 动能定理一个最大的缺点就是所求取的是滑坡整体下滑时的平均速度, 不能反映滑坡下滑过程中速度的动态变化。要弄清楚滑坡的最大速度及运动过程中速度的变化规律, 必须计算出滑坡局部岩土体运动到前缘的速度。潘家铮在文献[1]中提出的垂直条分法是一种较好的解决方法。

潘家铮计算公式是在滑坡未入水的条件下得到的, 公式适用于岸上土条。由于库岸滑坡滑动一般发生在水库蓄水之后, 因此, 必须考虑库水对滑坡的影响。此外, 潘家铮计算公式中摩擦系数 f_i 是个定

值, 而实际上, 当滑坡滑出滑床后, 其土条底的摩擦系数将发生改变, 在滑速计算中应该考虑土条底摩擦系数变化的影响。本文针对这些具体问题, 对潘家铮垂直条分法计算公式进行改进。

1 潘家铮垂直条分法计算公式

潘家铮在文献[1]中提出的计算模型见图1和图2, 其计算方法如下:

在滑坡体上取出一个垂直分条, 设为 i 号, 其上除作用有自重 W_i (地下水位以上用湿容重计算, 以下用饱和容重计算) 外, 尚作用有以下各力:

①滑面上反力: 法向力 N_i , 切向力 $f_i N_i + C_i$ (f_i 为垂直分条底摩擦系数, $f_i N_i$ 为摩擦力, C_i 为其他阻力);

②垂直界面上反力: 法向力 $H_i/H + \Delta H_i$ (该力包含条块两侧受到的水压力); 切向力 $Q_i/Q + \Delta Q_i$;

③扬压力 U_i 。

该垂直分条的动力平衡方程为

收稿日期(Received date): 2012 - 03 - 10; 改回日期(Accepted): 2012 - 05 - 08。

基金项目(Foundation item): 广东省水利科技创新基金(2009 - 36) 资助。 [Supported by Guangdong Water Conservancy Science and Technology Innovation Fund (Grant No. 2009 - 36) .]

作者简介(Biography): 黄锦林(1971 -), 男, 江西省赣县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程及防洪减灾研究工作。 [Huang Jinlin(1971), male, come from Gan county, Jiangxi province, Ph. d., professor-level senior engineer, mainly engaged in water conservancy and hydropower engineering and the flood control and disaster reduction.] E-mail: hjl@gdsky.com.cn

$$\frac{W_i}{g} a_x = \Delta H_i + (N_i + U_i) \sin \alpha_i - (f_i N_i + C_i) \cos \alpha_i \quad (1)$$

$$\frac{W_i}{g} a_{yi} = \Delta Q_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) - N_i \cos \alpha_i - (f_i N_i + C_i) \sin \alpha_i \quad (2)$$

式中 a_x 及 a_{yi} 分别指该垂直分条的水平垂直加速度 α_i 为垂直分条底部倾斜角度。假定滑坡在滑动过程中各垂直分条仍为垂直条,即将每一分条按刚体处理,各垂直分条不产生水平错动,仅是由于滑动面的变化产生垂直错动。根据假定,各条块的水平加速度 a_x 是相同的,所以用一个符号 a_x 记之;而各条块的垂直加速度 a_y 可以各不相同,故以 a_{yi} 记之。

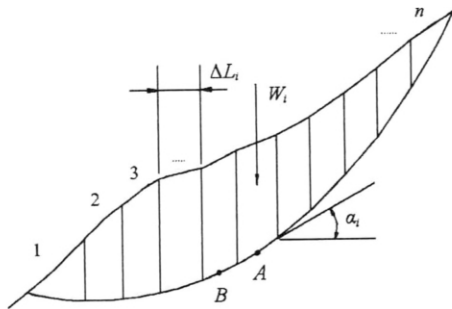


图1 滑坡分块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of landslide slices

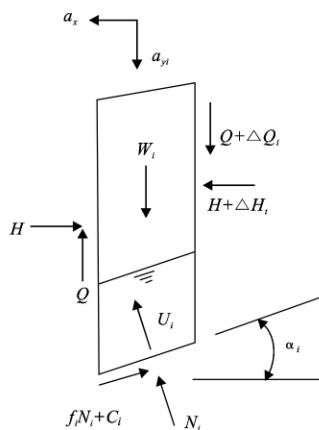


图2 滑坡上条块受力示意图

Fig. 2 Force diagram of the landslide slice

潘家铮通过分析认为 a_x 与 a_{yi} 间存在一定的比例关系,即 $\frac{a_{yi}}{a_x} = \tan \alpha_0$, α_0 为这一条块与下一条块中点连线的夹角。此外,潘家铮在分析中略去切向力 Q 的作用,相当于假定各条块间完全无摩擦及其他

阻力,这一假定将导致偏于安全的结果。于是,式(1)、(2)可变换为

$$\frac{W_i}{g} a_x = \Delta H_i + (N_i + U_i) \sin \alpha_i - (f_i N_i + C_i) \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$\frac{W_i}{g} a_x \tan \alpha_0 = (W_i - U_i \cos \alpha_i) - N_i \cos \alpha_i - (f_i N_i + C_i) \sin \alpha_i \quad (4)$$

对于每一垂直分条,由式(4)可得

$$N_i = \frac{(W_i - U_i \cos \alpha_i) - C_i \sin \alpha_i - \frac{W_i}{g} a_x \tan \alpha_0}{\cos \alpha_i + f_i \sin \alpha_i} \quad (5)$$

对于滑坡整体而言 ΔH_i 为内力,因而有

$$\sum_{i=1}^n \Delta H_i = 0 \quad (6)$$

将式(3)就所有分条取和,可得

$$\frac{W}{g} a_x = \sum_{i=1}^n N_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^n U_i \sin \alpha_i - \sum_{i=1}^n f_i N_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^n C_i \cos \alpha_i \quad (7)$$

式(7)中 $W = \sum_{i=1}^n W_i$ 为滑坡体的全部重量, g 为重力加速度。将式(5)代入式(7)中,可以解出 a_x 为

$$a_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - U_i \cos \alpha_i) D_i - \sum_{i=1}^n C_i (D_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) + \sum_{i=1}^n U_i \sin \alpha_i}{W + \sum_{i=1}^n W_i D_i \tan \alpha_0} \right] g \quad (8)$$

式中

$$D_i = \frac{\sin \alpha_i - f_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + f_i \sin \alpha_i} \quad (9)$$

2 垂直条分法改进计算公式

当滑坡岸上部分的条块滑入水中及原本就位于水下部分的条块在滑动过程中将受到水的阻力 R_j 作用,此外,对于库水位以下的土条,应采用浮容重来计算下滑力和抗滑力。取库水位以下一土条,设为 j 号,其上除作用有自重 W_j (采用浮容重计算)外,还作用有以下各力:

1. 滑面上反力:法向力 N_j ,切向力 $f_j N_j + C_j$ (f_j 为垂直分条底摩擦系数, $f_j N_j$ 为摩擦力, C_j 为其他阻力);

2. 垂直界面上反力:法向力 $H, H + \Delta H_j$ (该力包含条块两侧受到的水压力);切向力 $Q, Q + \Delta Q_j$;库水位以下土条的受力见图3。库水位以下土条的动力平衡方程为

$$\frac{W_j}{g} a_x = \Delta H_j + N_j \sin \alpha_j - (f_j N_j + C_j) \cos \alpha_j - R_j \quad (10)$$

$$\frac{W_j}{g} a_{yj} = \Delta Q_j + W_j - N_j \cos \alpha_j - (f_j N_j + C_j) \sin \alpha_j \quad (11)$$

式中 a_x 及 a_{yj} 分别指该水下土条的水平垂直加速度, α_j 水下为垂直分条底部倾斜角度。根据潘家铮的计算假定 $\frac{a_{yj}}{a_x} = \tan \alpha_0$, α_0 为这一条块与下一条块中点连线的夹角。略去切向力 Q 的作用, 式(10)、(11) 变换为

$$\Delta H_j + N_j \sin \alpha_j - (f_j N_j + C_j) \cos \alpha_j - R_j = \frac{W_j}{g} a_x \quad (12)$$

$$W_j - N_j \cos \alpha_j - (f_j N_j + C_j) \sin \alpha_j = \frac{W_j}{g} a_x \tan \alpha_0 \quad (13)$$

由式(13) 可推得

$$N_j = \frac{W_j - C_j \sin \alpha_j - \frac{W_j}{g} a_x \tan \alpha_0}{\cos \alpha_j + f_j \sin \alpha_j} \quad (14)$$

对于库水位以下滑坡体而言, 有

$$\sum_{j=1}^n \Delta H_j = T \quad (15)$$

式中 T 为水上、水下交界处由水上土条传给水下土条的水平推力。

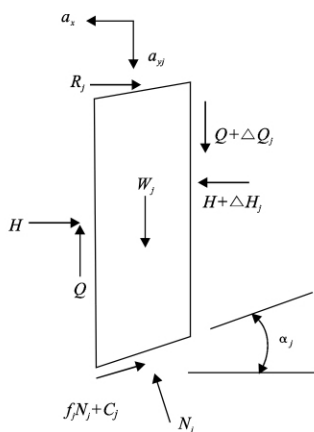


图3 库水位以下土条受力示意图

Fig. 3 Force diagram of the slice under the water level

设该滑坡体共分为 n 个土条, 土条总重量为 W 。其中库水位以下共有 n_1 个土条, 其总重量为 $W_{\text{水下}}$; 库水位以上共有 n_2 个土条, 其总重量为 $W_{\text{水上}}$

$$n_1 + n_2 = n \quad (16)$$

$$W_{\text{水上}} + W_{\text{水下}} = W \quad (17)$$

将式(12) 对所有库水位以下土条取和, 可得

$$\sum_{j=1}^{n_1} \frac{W_j}{g} a_x = T + \sum_{j=1}^{n_1} N_j \sin \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} f_j N_j \cos \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} C_j \cos \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} R_j \quad (18)$$

令

$$R = \sum_{j=1}^{n_1} R_j \quad (19)$$

$$W_{\text{水下}} = \sum_{j=1}^{n_1} W_j \quad (20)$$

式中 R 为水阻力的合力。则式(18) 变为

$$\frac{W_{\text{水下}}}{g} a_x = T + \sum_{j=1}^{n_1} N_j \sin \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} f_j N_j \cos \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} C_j \cos \alpha_j - R \quad (21)$$

由前节分析可知, 对于库水位以上的土条有

$$\frac{W_{\text{水上}}}{g} a_x = \sum_{i=1}^{n_2} N_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^{n_2} U_i \sin \alpha_i - \sum_{i=1}^{n_2} f_i N_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^{n_2} C_i \cos \alpha_i - T \quad (22)$$

其中

$$N_i = \frac{(W_i - U_i \cos \alpha_i) - C_i \sin \alpha_i - \frac{W_i}{g} a_x \tan \alpha_0}{\cos \alpha_i + f_i \sin \alpha_i} \quad (23)$$

将式(21) 和式(22) 的左右两侧式子相加可得

$$\frac{W}{g} a_x = \sum_{i=1}^{n_2} N_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^{n_2} U_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^{n_2} f_i N_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^{n_2} C_i \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^{n_1} N_j \sin \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} f_j N_j \cos \alpha_j - \sum_{j=1}^{n_1} C_j \cos \alpha_j - R \quad (24)$$

将式(14) 和式(23) 代入式(24) 中, 可得

$$a_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_2} (W_i - U_i \cos \alpha_i) D_i - \sum_{i=1}^{n_2} C_i (D_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) + \sum_{i=1}^{n_2} U_i \sin \alpha_i}{W + \sum_{i=1}^{n_2} W_i D_i \tan \alpha_0 + \sum_{j=1}^{n_1} W_j D_j \tan \alpha_0} + \frac{\sum_{j=1}^{n_1} (W_j D_j - \sum_{j=1}^{n_1} C_j (D_j \sin \alpha_j + \cos \alpha_j) - R)}{W + \sum_{i=1}^{n_2} W_i D_i \tan \alpha_0 + \sum_{j=1}^{n_1} W_j D_j \tan \alpha_0} \right] g \quad (25)$$

式中

$$D_i = \frac{\sin \alpha_i - f_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + f_i \sin \alpha_i} \quad (26)$$

$$D_j = \frac{\sin \alpha_j - f_j \cos \alpha_j}{\cos \alpha_j + f_j \sin \alpha_j} \quad (27)$$

对于任一条块, 设水平滑动的初速度为 V_{i1x} , 末速度为 V_{i2x} , 水平滑动距离为 L_i , 滑动时间为 T_i , 由物理学知识可得

$$V_{i2x} = \sqrt{V_{i1x}^2 + 2a_{ix}L_i} \quad (28)$$

$$T_i = \frac{V_{i2x} - V_{i1x}}{a_{ix}} \quad (29)$$

对具体的滑坡而言,当土条宽度 L_i 选定以后,由式(28)和式(29)就可以求出条块的运动速度和运动时间。计算时初始的运动速度可取 0,计算过程中当发现 $V_{i2x} \leq 0$ 时表明滑坡运动停止,计算结束。

3 鹅公带古滑坡滑速分析

鹅公带古滑坡位于某新建水利枢纽坝址上游 1.3 km,分布在右岸。研究表明,鹅公带古滑坡在水库蓄水运行后将产生滑动,且从地形条件判断,滑动后将保持整体的齐头并进的运动方式,形态基本维持不变。这基本符合垂直条分法计算滑速的假定,可采用垂直条分法来计算分析鹅公带古滑坡的滑速。图 4 是鹅公带古滑坡的土层分布示意图,图 5 是鹅公带古滑坡条分模型。采用垂直条分法计算时共将其分为 49 个土条,每个土条宽度为 10 m。

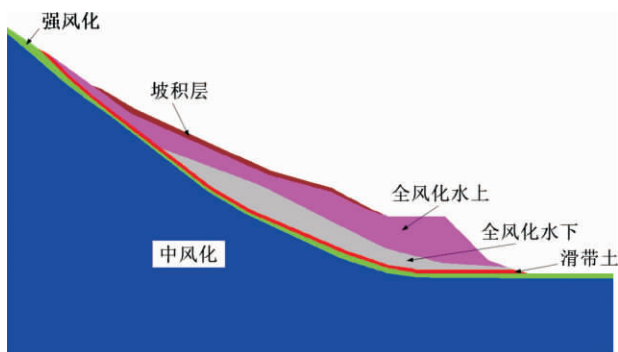


图 4 鹅公带古滑坡土层分布示意图

Fig. 4 Soil layers distribution of Egongdai ancient landslide

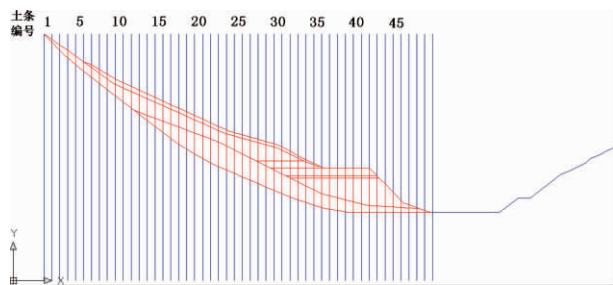


图 5 鹅公带古滑坡条分模型

Fig. 5 Slice model of Egongdai ancient landslide

滑速分析时,阻力 R 按下式计算^[2]

$$R = \frac{1}{2} c_w \rho_f V^2 S \quad (30)$$

式中 c_w 粘滞阻力系数, 0.15 ~ 0.18, 计算时取 0.18; ρ_f : 浮容重 (g/m^3); V : 水下运动速度 (m/s), 为简便计, 计算时取条块初始时刻的运动速度; S : 水中运动条块的迎水表面积 (m^2)。

对于摩擦系数 f , 当滑块仍在滑坡体内的滑床上滑动时, 按下式计算

$$f = \tan \varphi \quad (31)$$

式中 φ 为滑带土的内摩擦角 ($^\circ$), 计算采用滑坡稳定分析时推算的滑坡滑动时临界 φ 值。当滑块脱离滑床滑入库水后, 摩擦系数 f 在库水浮托力及润滑作用下将进一步减小, 其取值目前还没有统一的标准, 可参考《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287-99) 中坝、闸基础底面与地基土之间摩擦系数来取值^[3]。

表 1 鹅公带古滑坡土层参数

Table 1 Soil parameters of Egongdai ancient landslide

土层	重度 (kN/m^3)	摩擦角 ($^\circ$)	粘聚力 (kPa)
坡积层	19	15	35
全风化(水上)	19.5	34.7	55.8
全风化(水下)	20.9	29.7	48
滑带	21	24.1	23.1

表 1 是结合地质勘察和土工试验资料确定的鹅公带古滑坡土层参数, 其中滑带土的摩擦角和粘聚力为采用强度折减法推算的滑坡滑动时临界 φ 、 c 值。滑块脱离滑床滑入库水前的底摩擦系数取 $f = \tan \varphi = 0.45$, 滑块脱离滑床滑入库水后的底摩擦系数取 $f = 0.25$ 。计算采用 Excel 表按土条宽度 10 m 逐段进行, 表 2 是采用垂直条分法改进计算公式得到的鹅公带古滑坡失稳工况下的滑动计算结果^[4]。图 6、图 7 是采用潘家铮公式和本文提出的改进公式的计算结果比较^[4], 可以看出, 计算结果还是有一定差异的。

计算表明, 滑坡在滑动过程中经历了先由静止加速达到最大滑速后, 再由最大滑速减速回复静止的变化过程。这是因为在滑坡启动时, 提供下滑力的是重力, 此时由于滑速很小, 水阻力也相应很小, 滑坡在重力的主导作用下做加速运动, 加速度很快达到峰值。随着滑块入水条块增多、底坡度变缓,

表 2 鹅公带古滑坡滑动计算结果

Table 2 Computational results of Egongdai ancient landslide sliding

计算工况	最大水平滑动加速度 /(m/s^2)	最大水平滑动速度 /(m/s)	滑动时间 /s	最大水平滑动位移 /m
工况 1: 汛限水位	0.514	5.79	34.0	116
工况 2: 设计洪水水位骤降至正常水位	0.740	8.03	32.0	159
工况 3: 正常水位骤降至汛限水位	0.590	6.50	32.7	128
工况 4: 正常水位骤降至极限死水位	0.736	8.00	29.4	148

下滑力逐渐减小,但入水条块的增多、速度的增大导致水阻力相应增大,使得滑坡的滑动加速度在增至最大后开始迅速减小,但在加速度变为 0 以前,滑坡仍在加速运动。当加速度 <0 以后,滑坡开始减速运动,此时虽然滑速在逐渐减小,但入水条块的迎水面积在逐渐增大,水阻力仍然与滑块底部的摩擦力一起共同阻止滑块的前进,直至滑块停止。改进公式考虑了水阻力及滑块脱离滑床滑入库水后底摩擦系数的变化影响,与实际情况更接近,计算结果精度更高。

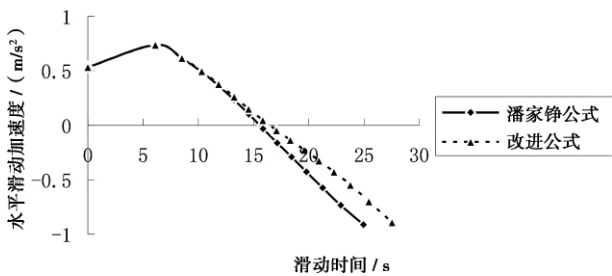


图 6 两种算法水平滑动加速度比较
(设计洪水水位骤降至正常蓄水位)

Fig. 6 Comparison of horizontal sliding acceleration by two methods
(Design flood level dropping to normal water level)

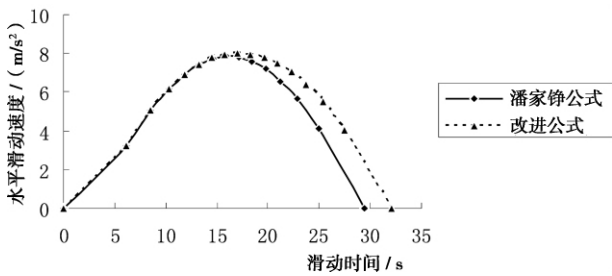


图 7 两种算法水平滑动位移比较
(设计洪水水位骤降至正常蓄水位)

Fig. 7 Comparison of horizontal sliding displacement by two methods
(Design flood level dropping to normal water level)

4 结语

库岸滑坡的滑速分析有别于一般的滑坡。对于库岸滑坡而言,当滑坡失稳滑动后,除受滑坡体自重、滑面上的阻力作用外,还将受到库水阻力、河床底部的摩擦阻力等作用,这是与一般滑坡最大的区别,也是判断滑坡滑动速度、滑动距离等运动学特征的关键。本文在潘家铮垂直条分法基础上提出的改进计算式考虑了库岸滑坡滑动过程中受库水作用的影响,计算结果更符合实际。采用改进计算式计算得到的鹅公带古滑坡蓄水失稳滑动后的最大水平滑速约 8 m/s,属于高速滑坡,这与采用层次分析法得到的结论基本一致^[5]。本文的研究表明,垂直条分法改进计算公式对提高库岸滑坡滑速计算精度有一定意义,推荐在进行库岸滑坡滑速分析时采用本文提出的计算方法。

参考文献 (References)

[1] Pan Jiazheng. Stability against sliding and landslide analysis of building [M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980: 120 – 132 [潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1980: 120 – 132]

[2] Chuen – Yen Chow, Sun Xianghai, Zhou Wenbo, et al. An introduction to computational fluid dynamics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University Press, 1987: 5 – 20 [Chuen – Yen Chow, 孙祥海, 周文伯, 等. 计算流体力学导论 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987: 5 – 20]

[3] Code for water resources and hydropower engineering geological investment [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999: 53 [GB50287 – 99. 水利水电工程地质勘察规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 53]

[4] Huang Jinlin. Study on the surge of reservoir bank landslide and it's effect on dam body [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 62 – 70 [黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011: 62 – 70]

[5] Huang Jinlin, Zhao Jiguo, Zhang Ting, et al. AHP – based hazard de-

gree assessment of high-speed landslide of reservoir bank [J]. Journal of Natural Disasters 2011 20(5):95-99 [黄锦林, 赵吉国,

张婷. 等. 基于层次分析法的库岸高速滑坡危险度评价 [J]. 自然灾害学报 2011 20(5):95-99]

Sliding Velocity Analysis of Reservoir Bank Landslides Based on the Improved Vertical Slice Method

HUANG Jinlin^{1 2}, ZHONG Zhihui³, ZHANG Mingfei⁴

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China;

2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510630, China;

3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072, China;

4. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Based on the Pan Jiazheng vertical slice method formula and considering the water resistance and the decrease of friction coefficient after the water influence, this paper proposes an improved formula of vertical slice method that is feasible to analyze the sliding velocity of landslides near reservoir. With this formula, this paper analyzes the sliding velocity of Egongdai ancient landslide under unstable situation, and compares the difference of those two methods. The results shows that after water storage, the maximum horizontal velocity of Egongdai ancient landslide is about 8 m/s when it is sliding, and the results by the two methods are some different. Having considered the water influence during sliding, the results by the improved formula of vertical slice method is more close to the reality, which can enhance the accuracy of the sliding velocity calculation for reservoir landslides. This research has some important reference values to the sliding velocity analysis of reservoir landslides.

Key words: reservoir bank landslide; sliding velocity calculation; vertical slice method; improved formula; Egongdai ancient landslide