库区滑坡稳定性二维、三维分析与应用

胡兴娥[1]，李明超[*,1]，徐长义[2]
(1.天津大学建筑工程学院，天津 300072；2.中国长江三峡工程开发总公司，湖北 宜昌 443002)

摘 要：库区滑坡的地形、滑床及其地下水位面等几何形状复杂，具有典型的三维特征，为了更合理地分析评价其稳定性，在同等条件下选取二维剩余推力法和三维极限平衡法同时进行计算对比分析。以某库区滑坡作为实例，分别运用二维、三维方法反演确定其强度参数，计算各典型库水位下的滑坡稳定系数，并对滑坡稳定系数在水库水位变化（包括上升和下降变化）的情况下进行了敏感性对比分析。结果表明，三维方法的计算分析结果更为客观、合理；而且综合二维、三维计算结果进行分析，可得到符合实际的结论，为分析评价库区滑坡稳定性提供了一条好的途径。
关键词：稳定性分析；剩余推力法；三维极限平衡法；库区滑坡
中图分类号：TU457 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)11－1642－05
作者简介：胡兴娥(1965－)，女，湖北公安人，博士研究生，高级工程师，主要从事水库库区滑坡研究。E-mail: hu_xinge@ctgpc.com.cn。

2D and 3D stability analysis of landslides in reservoir areas and its application

HU Xing-e[1], LI Ming-chao[1], XU Chang-yi[1,2]
(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Yangtze River Three Gorges Project Development Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract: The topography, sliding surface and ground water level of landslides in reservoir areas would appear with complex geometries and typical 3D features. To evaluate their stabilities more rationally, the analysis could be adopted by use of 2D residual thrust method and 3D limit equilibrium method under the same condition. For a practical example from a reservoir area, some aspects were processed by 2D and 3D methods respectively, such as the inversion of two strength parameters, the calculation of stability factors in various typical water levels of the reservoir, and the sensitivity analysis of stability factors under the condition of rising and drawdown of water levels. It was indicated that 3D method was more rational and more objective than 2D method. And, through the integrated analysis of the 2D and 3D results, the better conclusion of the slope stability could be gained. Therefore a better way to evaluate the stability of landslides in reservoir areas would be proposed.
Key words: stability analysis; residual thrust method; 3D limit equilibrium method; landslide in reservoir area

0 引 言

滑坡稳定性计算分析方法的研究一直是滑坡研究的热点和难点，先后出现了工程地质类比法、极限平衡分析法、极限分析方法、应力应变分析法、模型试验法等方法[1]，它们在国内外各种滑坡稳定性评价中得到了大量实践。其中二维极限平衡分析法的分析结果通常作为稳定性判断和工程设计的依据[2]。但研究资料表明[3-4]，由于二维方法将滑坡近似地作为平面应变问题处理，不能考虑滑体沿滑床滑动时侧面的阻滑力作用，计算结果往往偏小；因而常会出现滑坡稳定系数小于 1.0，实际却是稳定的现象，或为滑坡工程治理而推求出的剩余下滑力极大，使得设计加固措施时造成不必要的浪费。同时由于组成滑坡的岩土体通常呈非均质，坡体几何形状多变，其地表面和底滑面都具有复杂的形态，破坏模式通常是三维的；使用二维极限平衡法分析滑体的稳定性，会使滑坡实际三维破坏机制过于简化，计算结果偏于保守，而在反算岩土体强度参数时偏于风险，因此，应把滑坡的稳定性分析作为空间问题来研究，将二维分析扩展为三维分析，使计算结果符合实际[4]。

由于水库大都处于高山峡谷，库区滑坡的地形、滑床及其地下水位面等几何形状复杂，不管边界条件是整体失稳还是界面局部失稳，都具有典型的三维特征，采用三维方法来分析滑坡稳定性更为合理。本文

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50479048）
收稿日期：2006－10－12
*通讯作者

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

针对某一实际的库区滑坡，同时采用二维和三维极限平衡法对其稳定性进行计算分析，比较在同等条件下两者的计算结果，为综合分析评价库区滑坡稳定性及进行滑坡防治工程设计提供参考。

1　计算方法原理

1.1　二维剩余推力法

剩余推力法又称传递系数法或不平衡推力传递法。该法简单实用，可考虑复杂形状的滑动面，可获得任意形状滑动面在复杂荷载作用下的滑坡推力，常用于抗滑桩加固设计计算。其假设条件和基本思想参见文献[5]，这里简要介绍其计算公式和求解方法。

用剩余推力法分条计算时各分条受力见图 1。

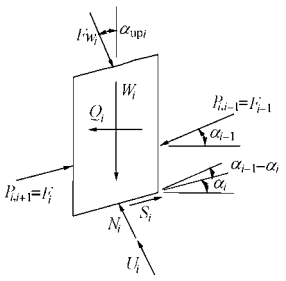


图 1 滑块受力分析

Fig. 1 Forces acting on a column

计算公式为

$$F_i=[(W_i+Fw_i\cos\alpha_{upi})\sin\alpha_i+Q_i\cos\alpha_i]-(C_il_i+[(W_i+Fw_i\cos\alpha_{upi})\cos\alpha_i-U_i-Q_i\sin\alpha_i]f_i)\cos\alpha_i)/K+F_{i-1}\phi_{i-1}\ 。\quad(1)$$

式中　F_i，F_{i-1}为第 i，i-1 分条的剩余推力；W_i为第 i 分条的重量；Fw_i为第 i 分条的库水压力；Q_i为第 i 分条的水平力（含 Fw_i水平分力）；α_i为第 i 分条底边与水平线的夹角；α_{upi}为第 i 分条顶边垂向与竖直向的夹角；N_i，S_i，U_i为第 i 分条底部法向反力、切向反力和孔隙压力；$\phi_{i-1}=\cos(\alpha_{i-1}-\alpha_i)-\dfrac{f_i}{K}\sin(\alpha_{i-1}-\alpha_i)$。

由式(1)即可利用剩余推力法求解滑坡稳定系数。以往一般通过试算法[5]进行求解，即不断调整稳定系数值使滑动面出口点剩余下滑力为零。该法求解速度与假定的安全系数初值和调整步长有很大关系，人为因素较大，计算效率低。这里采用迭代解法[6]，将滑动面出口点剩余下滑力为零作为已知条件代入公式进行求解，通过程序实现，简洁且收敛速度快。步骤为：

（1）假定滑坡稳定系数的初值为 K。

（2）用式（1）计算，直到第 n-1 分条；同时用下列两式计算 F_{Ri}和 F_{Si}，直到第 n 分条，

$$F_{R_i}=C_il_i+[(W_i+Fw_i\cos\alpha_{upi})\cos\alpha_i-U_i-Q_i\sin\alpha_i]f_i\ ，\quad(2)$$

$$F_{S_i}=[(W_i+Fw_i\cos\alpha_{upi})\sin\alpha_i+Q_i\cos\alpha_i]+F_{i-1}\phi_{i-1}-F_i。\quad(3)$$

（3）用下式计算新的滑坡稳定系数，

$$K^*=\sum_{i=1}^{n}F_{R_i}\Big/\sum_{i=1}^{n}F_{S_i}。$$

（4）比较 K*和 K，若|K–K*|满足精度要求（如小于 10^{-4}），即为所求稳定系数，输出该值；否则将 K*值赋给 K，从步骤（2）开始重新计算。

1.2　三维极限平衡法

三维极限平衡法继承了二维条分法的思想[7]，并根据力的平衡条件进行分析，其基本思想为[8]：①分别采用两组正交的垂直平面将滑坡体分为若干条柱体；②分块柱体界面间作用力仅考虑水平向的侧面压力和剪力，不考虑铅垂向的剪力；③根据铅垂向力的平衡条件和底滑面沿滑动方向力的平衡条件，进行公式推导。

图 2 为一空间条块（i，j）的受力分析示意图，根据铅垂方向力的平衡条件和底滑面沿滑动方向（Ox'方向）力的平衡条件，三维稳定系数 F_s仍取“材料强度储备系数”意义，其计算公式为

$$F_s=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\{C_{ij}A_{ij}\cos\gamma_{zdwij}+[(W_{ij}+F_{zij})-U_{ij}\cos\gamma_{zdwij}]f_{ij}\}\mathrm{g}\frac{\sec\alpha_{xij}}{\cos\gamma_{zdwij}+\dfrac{f_{ij}\sin\alpha_{xij}}{F_s}}\Big/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}[Q_{ij}-F_{xij}+(W_{ij}+F_{zij})\tan\alpha_{xij}]，\quad(2)$$

式中　C_{ij}，f_{ij}和 A_{ij}分别为条柱（i，j）的黏聚力、摩擦系数和底面面积；F_{xij}，F_{zij} 分别为表面水压力（垂直于坡面）F_{ij}分解在 Ox 方向的投影（与滑动方向相反时为正）和竖直方向的投影（向下为正）；W_{ij}，U_{ij}，Q_{ij} 分别表示条柱（i，j）的重力、底面水压力、总水平外力；γ_{zdwij}、α_{xij}分别为条柱（i，j）的滑面法向与

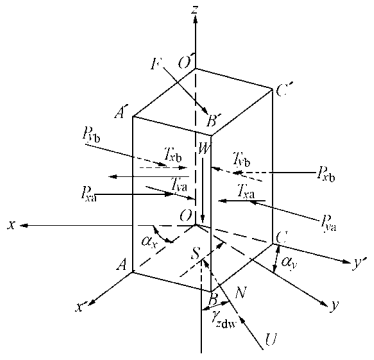


图 2 三维滑体条柱受力示意图

Fig. 2 Forces acting on a 3D column

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铅垂方向夹角、角$\angle xOx'$；m，n 则分别为滑坡体沿滑动方向和垂直滑动方向所划分的条柱数。

F_s 值通过试算求解，该公式是通过力的平衡条件而未考虑力矩平衡的情况下推导出的，所以适用于任意形状滑面。

2 滑坡稳定性对比分析实例

某库区滑坡体地表面和底面形态复杂，厚度大。该滑坡的稳定系数计算边界条件为整体失稳模式（图 3），主滑动方向为图 3 所示剖面方向。

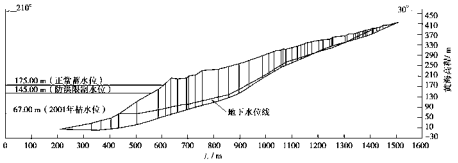


图 3 整体失稳边界条件二维模式图

Fig. 3 Boundary condition of 2D sliding failure

2.1 稳定性判断标准

滑坡稳定系数是判断滑坡稳定性、确定滑坡处理工程量的一项重要指标，直接关系着工程的安全性、经济性与合理性。然而，目前滑坡稳定系数的标准并无规范可循（可参见《水利水电工程地质勘察规范》（GB50287——99）附录 F）。因此，其判断标准必须根据特定滑坡的具体情况，分析影响滑坡稳定的各种因素来确定，主要因素有：①对滑坡地质条件的认识深度；②各项物理力学参数的准确度；③计算模式的合理性和计算方法的正确性：④滑坡防治工程的重要性及其失稳破坏后的危害程度。

在充分研究相关专业的规范要求和国内外大量滑坡工程实例的基础上，综合考虑本滑坡的重要性、地质勘探和试验成果的准确性、以及选择的计算模式与计算方法，确定其稳定性评价标准如表 1。

表 1 滑坡稳定性评价标准

Table 1 Criteria of the slope stability

稳定性	二维稳定系数 K	三维稳定系数 F_s
稳定	>1.10	>1.15
基本稳定	1.05~1.10	1.10~1.15
临界稳定	1.00~1.05	1.05~1.10
不稳	<1.00	<1.05

2.2 强度参数反演

滑坡强度参数的选择一般采用以下四条原则：①以室内试验参数为依据；②以滑带土的物质组成及工程地质性状为基础；③采用工程类比法，参考其它相关滑坡体计算参数；④根据滑坡体目前的稳定状态，反演其 c，φ值，并与试验值进行验证。

根据实际地质勘探，该滑坡体在未蓄水前一般枯水位 67.0 m 工况下二维稳定系数可取 1.10，三维取 1.15。通过反演计算分析，其成果如表 2。

表 2 滑坡体强度参数反演分析成果对比

Table 2 The backfigured results of two strength parameters

条件	抗剪强度（建议值）	
	c/kPa	φ/(°)
（二维）K=1.10	25.0	22.0
（三维）F_s=1.15	19.0	22.0

综合考虑上述反演分析成果和室内试验成果，该滑坡体强度参数选用值为：天然状态下黏聚力 c =22.5 kPa，摩擦角φ=22.0°；饱和状态下 c =19.6 kPa，摩擦角φ = 20.4°。此外，根据现场试验，滑坡体总体天然重度为 2.27 t/m^3，饱和重度为 2.39 t/m^3。

2.3 稳定系数计算

滑坡沿主滑动方向的二维条分模型图见图 3，长 1299.3 m；根据地表面和底滑面的几何形状选取了 56 个控制点，竖直条分共划分了 55 个条柱；地下水位线由离散的钻孔常水位插值拟合成连续的曲线。因此该模型的主要几何参数包括 56 组控制点坐标，每组控制点由地表面、底滑面和地下水三个控制点（x，y）组成，x 轴沿滑动方向，y 轴为竖直方向（表示高程）。

滑坡体的三维计算模式图和剖分模型图分别如图 4（可清楚看到滑坡体和滑动面的三维面貌）、图 5 所示，沿主滑动方向最大长度为 1196.07 m，垂直方向最大宽度为 567.23 m；沿滑动方向和垂直滑动方向进行滑坡体剖分的边长均为 20.0 m，剖分滑块总数 1167 块；每个滑块的几何参数包括滑块编号、总体积、地下水以上体积、地下水以下体积、滑面面积、α_x、γ_{zdw}、滑面前后缘高程、表面前后缘高程及地下水前后缘高程等共 13 组数据信息。

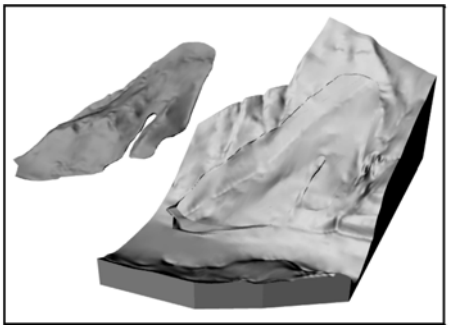


图 4 整体失稳边界条件三维模式图

Fig. 4 Boundary condition of 3D sliding failure

基于选定的参数条件和建立的计算几何模型，分别采用二维剩余推力法和三维极限平衡法对该滑坡在各种稳定的库水位工况下的稳定系数进行计算，其结果见表 3 所示。

依据表 1 给出的判断标准，表 3 中的二维 K 值均在 1.05～1.10 之间，判断为基本稳定；而三维 F_s 值均

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大于 1.15，判断为稳定。因此认为，在各种稳定水位的正常工况下，该滑坡体是稳定的。

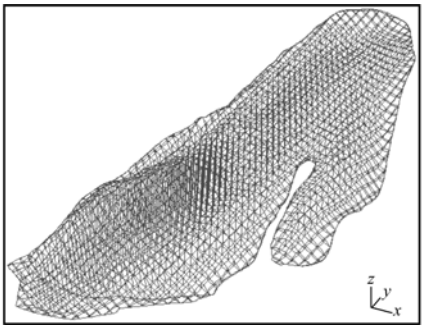


图 5 滑坡体三维剖分模型图

Fig. 5 3D model fordivision of the slope

表 3 正常工况下的滑坡稳定性计算成果

Table 3 Calculated results of slope stability under the normal conditions

水位/m	稳定系数	
	二维 K	三维 F_s
135.0	1.078	1.152
145.0	1.076	1.156
156.0	1.071	1.161
175.0	1.067	1.177
180.4	1.066	1.185

2.4　敏感性分析对比

影响滑坡稳定性的因素有多种，对于库区滑坡，在不同的水位条件下，滑坡体所受的库水压力和地下水条件均会发生变化，必然对滑坡体的稳定性产生影响[9]。本文针对水库水位变化（包括上升和下降）因素对该滑坡稳定系数进行二维和三维敏感性分析。

（1）水位上升变化

主要考虑河床水位从水库蓄水前的一般枯水位 67.0 m 上升到蓄水后的正常蓄水位 175.0 m 之间，在各种稳定水位的正常工况条件下滑坡体稳定系数变化情况。其二维和三维敏感性分析成果如图 6 所示。

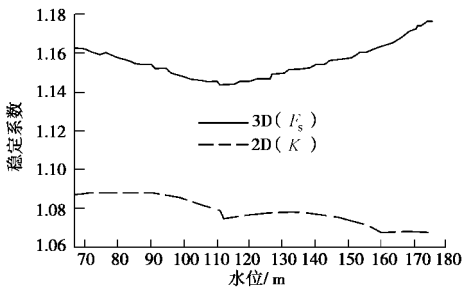


图 6 水位上升下的滑坡稳定系数变化曲线图

Fig. 6 Variation of the slope stability under the rising conditions of water level

从图中可以看到，二维稳定系数均在 1.05～1.10 之间，水位每变化 20.0 m 则 K 值变化平均约 0.005；三维稳定系数在 1.14～1.18 之间，水位每变化 20.0 m 则 F_s 值变化平均约 0.01；滑坡在水位上升过程中是稳定的，且稳定系数对水位上升变化的敏感度不高。

然而，在同样的条件下，二维和三维计算不仅稳定系数值有较大差别，且变化趋势也不相同。其原因在于：不同水位影响滑坡稳定系数主要在于库水压力的不同，库水压力是垂直于滑坡坡面的，其水平分力有利于滑坡稳定，而其竖直分力则对滑坡稳定不利。

对于二维分析，计算几何模型只是一个剖面，库水压力的分解由每一条柱顶边的倾斜度 α_{up}（与水平方向的夹角）决定：若 α_{up}>45°，水平分力大于垂直分力，库水压力有利于提高滑坡稳定性；若 α_{up}<45°，库水压力将导致滑坡稳定性下降。在二维计算几何模型（图 3）中，条柱顶面高程在 175.0 m 水位以下的共 7 条，其中 α_{up} 最大的为 38.6°，因此在水位从 67.0 m 上升到 175.0 m 的过程中，二维稳定系数的总体变化趋势是逐渐降低的，如图 6 虚线所示；只是由于水位变化造成地下水条件的变化使得局部变化趋势不一样。

对于三维分析，由图 6 实线可知，随着水位的升高，F_s 值先逐渐降低，约在 112.0 m 水位时达到最低，然后稳步提升，一直到 175.0 m 水位；三维模型是根据真实的滑坡体剖分而来，由图 4 可知，在 112.0 m 水位以下，库水与滑坡体的接触面积相对较小，库水压力水平分力小于其垂直分力，导致稳定性降低；而在 112.0 m 水位以上，库水与滑坡体的接触面积增大使水平分力大于垂直分力，有利于滑坡体稳定。

（2）水位下降变化

考虑库水位从 175.0 m 下降至 145.0 m 的条件下对滑坡稳定性的影响，主要针对下降时间为 7 d，10 d，15 d 和 20 d 的典型情况。实践经验表明，库区水位的骤降是促使库岸滑坡发生失稳的一个重要原因[10]，主要是由于库水位骤降时滑坡体内地下水位下降相对滞后，浸泡滑坡前缘的库水在滑坡内将产生不利于其稳定的动水压力作用。这是一个不定常的渗流问题，由于边界条件及渗流介质的复杂性，要精确确定其大小比较困难。本文采用的方法为：综合考虑与问题相关的诸多因素，如库水的下降速度、滑体的渗透系数和孔隙率等，根据布西涅斯克（Boussinesq）非稳定渗流基本微分方程和边界条件[11]，得到库水位等速下降时滑坡体内浸润线的简化计算公式，进行库水位下降的敏感性分析，计算成果如表 4。

由该表可知，库水位在 7～20 d 内从 175.0 m 降至 145.0 m，二维结果表明滑坡处于临界稳定，三维 F_s 值均在基本稳定范围内，二维结果相对保守。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 库水位下降时的滑坡稳定系数

Table 4 Slope stability results under the drawdown condition

项目	下降时间			
	7 d	10 d	15 d	20 d
二维 K	1.007	1.011	1.016	1.019
三维 F_s	1.104	1.111	1.123	1.136

3 结 论

(1) 从滑坡强度参数反演、各库水位正常工况下的稳定系数计算和库水位变化下的稳定系数敏感性分析均可以看出，二维计算结果相对于三维结果保守。

(2) 在全面考虑滑坡体受力条件的前提下，在 135.0～180.4 m 各稳定水位的正常工况下，二维 K 值均维持在 1.07 左右，三维 F_s 值均在 1.15～1.17 之间，滑坡体在天然情况下整体稳定性较好。

(3) 根据库水位上升变化敏感性分析，虽然在库水位稳定上升的过程中滑坡体稳定性仍较好，但是值得注意的是二维 K 值随着水位的升高而逐渐降低，而三维 F_s 值则先降低后增大，分析表明：三维计算结果的变化趋势是正确的，二维方法存在明显的局限性。

(4) 对于具有典型三维特征的滑坡体，尤其是库区滑坡，三维方法的计算分析结果较之二维分析更为合理和客观；但由于其几何建模和计算过程的复杂性，以及有待进一步完善的理论基础，目前尚未在实际应用中得到广泛接受；因此，将滑坡稳定性的二维、三维计算结果进行对比综合分析，可得到更客观实际的评价结论，为分析评价库区滑坡稳定性和滑坡防治工程设计提供了一条较好的途径。

参考文献：

[1] 杨 健. 边坡稳定性的综合评价方法及应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001. (YANG Jian. Comprehensive assessment method for slope stability and its application[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2001. (in Chinese))

[2] 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^{3D} 的设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(7): 1121－1125. (JIANG Qing-hui, WANG Xiao-hai, FENG Ding-xiang, et al. SLOPE^{3D} —— A three-dimensional limit equilibrium analysis software for slope stability and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1121－1125. (in Chinese))

[3] STARK T D, EID H T. Performance of three-dimensional slope stability analysis methods in practice[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(11): 1049－1060.

[4] 陈祖煜, 弥宏亮. 边坡稳定的二、三维极限分析方法和工程应用[M]// 中国岩石力学与工程——世纪成就. 南京: 河海大学出版社, 2004: 648－677. (CHEN Zu-yu, MI Hong-liang. 2D and 3D limit analysis methods for slope stability and their engineering applications[M]// Chinese Rock Mechanics and Engineering ― Centurial Achievements. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 648－677. (in Chinese))

[5] 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. (PAN Jia-zheng. Analysis on the stability and coast of the structure[M]. Beijing: Hydraulic Press, 1980. (in Chinese))

[6] 张 丹, 李同春, 乐成军. 论传递系数法求边坡稳定安全系数的两种解法[J]. 水利水电科技进展, 2004, **24**(2): 23－25. (ZHANG Dan, LI Dong-chun, LE Cheng-jun. Two methods for calculation of safety factor of slope stability by use of transfer coefficient method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, **24**(2): 23－25. (in Chinese))

[7] HUANG C C, TSAI C C, CHEN Y H. Generalized method for three-dimensional slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(10): 836－848.

[8] 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. (FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 657－661. (in Chinese))

[9] 朱冬林, 任光明, 聂德新. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, **29**(3): 6－9. (ZHU Dong-lin, REN Guang-ming, NIE De-xin, et al. Effecting and forecasting of landslide stability with the change of reservoir water level[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, **29**(3): 6－9. (in Chinese))

[10] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(5): 443－450.

[11] 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, 2003, **34**(12): 76－81. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(12): 76－81. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net