千将坪滑坡三维极限平衡分析

姜清辉[1,2]，张　煜[1]，罗先启[2]，郑　宏[2]

（1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉 430072；2. 三峡大学湖北省防灾减灾重点实验室，湖北 宜昌 443002）

摘　要：千将坪滑坡位于长江南岸支流青干河左岸，是三峡水库蓄水一个月后发生的水库新生型滑坡。通过将典型岩质顺层岸坡的千将坪滑坡恢复到未滑之前，采用三维极限平衡法对滑坡的整体稳定性和失稳下滑的触发因素进行了分析，探讨了水库蓄水和连续降雨对滑坡稳定性影响，计算分析成果表明，水库蓄水后的浸泡软化作用使滑坡体稳定条件急剧恶化，蓄水和强降雨的联合作用最终触发千将坪滑坡产生大规模深层滑动。

关键词：边坡工程；极限平衡；安全系数；千将坪滑坡；水库蓄水；降雨

作者简介：姜清辉（1972－　）1972年生，博士，副教授，主要从事岩土力学数值方法与施工仿真方面的教学与科研工作。

0　引　　言

千将坪滑坡位于长江南岸支流青干河左岸[1-3]，秭归县沙镇溪镇千将坪村向南东倾斜的斜坡上，斜坡坡度自上而下为35°～15°。滑坡发育在侏罗系中－下统聂家山组碎屑岩中，岩性为中－厚层粉砂岩夹粉沙质泥岩、页岩，岩层倾向与斜坡坡向基本一致，上陡下缓，倾角35°～15°，构成顺向坡。2003年7月13日零时20分，千将坪滑坡发生整体性滑动，突然下滑约2000余万方。滑坡失稳后，巨大的涌浪和爬坡浪对沙镇溪镇镇址下部造成较大的冲击，使青干河水质混浊，山林植被局部破坏，土地使用价值降低。

千将坪滑坡发生在强降雨（2003年6月21日～7月11日，沙镇溪地区总降雨量162.7 mm）及三峡水库第一期135 m高程蓄水一个月后，是三峡水库蓄水后不久发生的上部沿层间剪切带顺层滑动、前缘切层滑出的大型较高速滑坡。本文通过将典型岩质顺层岸坡的千将坪滑坡恢复到未滑之前，采用三维极限平衡法对滑坡的整体稳定性以及失稳下滑的触发因素进行了研究，探讨了水库蓄水和连续降雨对滑坡稳定性影响。

1　千将坪滑坡工程地质特征

千将坪滑坡地质平面图如图1所示。滑坡地表总体形态为簸箕状，上窄下宽，宽度一般410～480 m，最宽处位于下部平台，宽521 m；滑坡及牵引变形区的前后缘总长约1200 m，滑坡平面面积约为0.52 km^2；滑体厚度中后部为20～30 m，中前部为40～50m，最大厚度59 m，滑体总方量约为2.4×10^7 m^3。

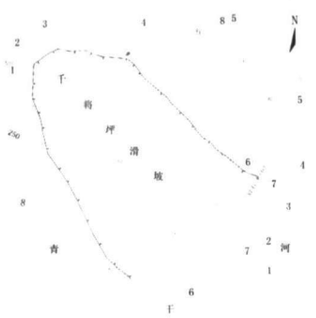


图1 千将坪滑坡地质平面图

滑体自上而下由3部分组成：崩坡积物，散裂岩体，块裂岩体。崩坡积物主要包括碎石土、粉质粘土夹块石，厚一般3～8 m，分布于滑坡中前部和滑体顶部；散裂岩体主要包括强—弱风化中厚层粉沙质泥岩、夹厚层长石石英砂岩，结构松散，局部见架空结构；块裂岩体是滑坡主要组成部分，岩体较完整，局部沿裂隙断开形成裂缝，原岩为中厚层粉沙质泥岩、泥质粉沙岩夹厚层长石石英砂岩，裂隙发育，厚一般为20～30 m。

滑坡滑带从物质组成和地质背景来划分可分为两大部分：中上部为顺层层间剪切错动泥化带，前缘为切层的近水平缓倾角不连续结构面（缓倾角裂隙性断层或破碎带）。滑面形态自后缘至前缘可分为三段：平直顺层滑面段（23°～26°）、顺层挠曲滑面段（10°～16°）和近水平切层滑面段，如图2所示。

滑坡滑床基岩为微风化新鲜的中厚层粉沙质泥岩、泥质粉沙岩夹厚层长石石英砂岩，仅沿部分裂隙有轻微蚀变，岩芯以柱状为主，岩体完整、稳定。

千将坪滑坡强、弱风化岩体内裂隙和卸荷风化软弱夹层较发育，由裂隙和卸荷风化软弱夹层形成立体网络状空隙含水，具较强透水性。正是由于岸坡强、弱风化岩体较强的透水性，使得三峡库水在一个月时间内完成了渗透侵入200～300m宽的库岸、浸泡软化降低滑带的抗剪强度。

2　滑坡三维可视化模型与计算参数

2.1　三维可视化模型

千将坪滑坡是典型的空间问题，鉴于地质条件复杂和滑坡形态特殊，采用三维极限平衡分析软件SLOPE^{3D}对千将坪滑坡稳定性进行计算分析。SLOPE^{3D}软件是针对岩土工程中的边坡稳定性评价而研发的，包括前处理、极限平衡分析求解器和后处理三部分组成[4-6]。前处理核心是构造三维边坡地层模型，后处理主要是计算结果分析和可视化图形显示，极限平衡分析

基金项目：国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目（50539100）；湖北省科技攻关计划课题（2004AA306B03）；湖北省防灾减灾重点实验室（三峡大学）开放基金资助项目（2002ZS07）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

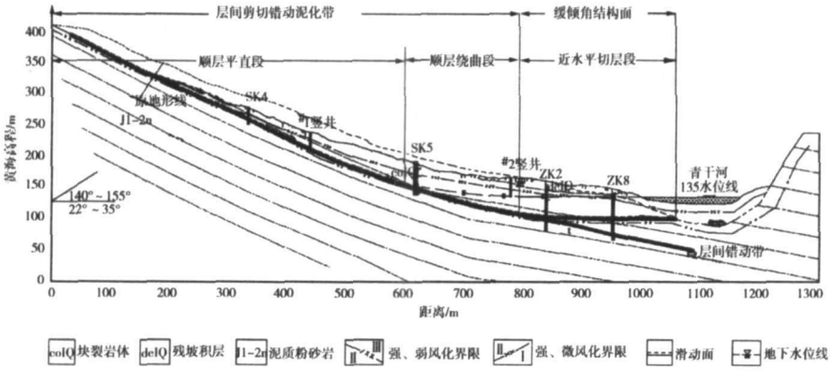


图 2 地质剖面图 2-2

求解器主要包括垂直条分法。前处理模块可以自动地进行滑体剖分和计算网格划分，在临界滑裂面的搜索中考虑了三种类型的滑面形状：已知滑面、剪切作用形成的球面以及组合滑裂面等。程序使用者可结合工程经验方便地确定可能的滑面和滑体范围，对工程上可能的多个滑动方向进行计算，自动搜索潜在最危险滑面及主滑方向，同时能考虑自重、地下水压力、地震作用等多种荷载及其组合。

千将坪滑坡计算模型为右手坐标系，Z 轴竖直向上，X 轴和滑动方向保持一致（与正北方向夹角为 137°），模型范围 $X \times Y \times Z = 1200\ \text{m} \times 700\ \text{m} \times 500\ \text{m}$。通过交互式地质平面与剖面数据采集，图形编辑，图象配准等几何操作，SLOPE^{3D} 可自动生成滑坡体三维可视化模型，如图 3 所示。考虑到野外平硐中测到的滑面的产状是变化的且在空间表现出一定的起伏，直接用平面去近似将会带来较大误差。SLOPE^{3D} 通过对剖面图（纵剖面 1-1、2-2、3-3 以及横剖面 6-6、7-7 和 8-8）上滑面的空间坐标进行采样和曲面拟合，实现了滑面空间几何形态的准确描述。

2.2 计算参数取值

滑体的密度取其组成物质的平均容重：天然密度取 25.1 kN/m^3；饱和密度取 26.2 kN/m^3。滑带抗剪强度参数取自地质报告建议值、工程类比及反演结果：滑坡顺层滑带非饱水状态下粘结力 c 取为 20 kPa，摩擦角 φ 取为 17.3°；饱水状态下粘结力 c 取为 15 kPa，摩擦角 φ 取为 14°；对于滑坡前缘切层滑带，非饱水状态下粘结力 c 取为 20 kPa，摩擦角 φ 取为 27°，受库水浸泡软化后，其强度参数 c 取为 0，摩擦角 φ 取为 15°。

3 计算结果与分析

3.1 滑坡稳定性安全系数

如图 3 所示，在 1200 m×700 m 的范围内对滑体所在的边坡剖分铅垂条块，条块在水平面上的投影为正方形，边长为 10 m，图 4 给出了千将坪滑坡在天然状态下的三维极限平衡分析成果，通过对滑动方向进行搜寻计算，得到千将坪滑坡主滑方向为 129°。计算成果表明，在天然状态下滑体稳定性安全系数为 1.417，满足整体稳定性要求，说明在自重作用下千将坪滑坡是稳定的，这和实际情况也是相吻合的。

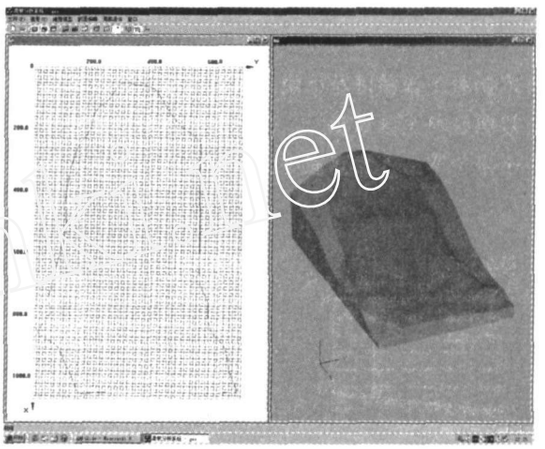


图 3 千将坪滑坡三维可视化模型和计算网格

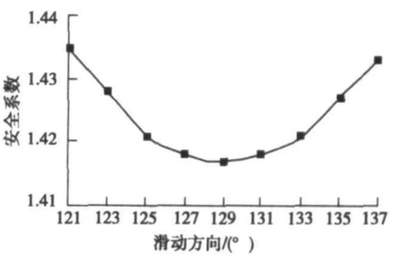


图 4 三维极限平衡计算成果

3.2 蓄水对滑坡稳定性影响

水库蓄水后，千将坪滑坡的滑体前沿淹没在水中，形成了沿库岸的浸没带，这是滑坡环境的一个重要变化。为了探讨水库蓄水对滑坡稳定性的影响，采用 SLOPE^{3D} 分析了蓄水高程分别为 105、115、125 以及 135 m 等不同工况条件下滑坡的稳定性安全系数（见表 1）。计算时滑带处于地下水位以下部分采用库水浸泡软化后的强度参数。

计算成果表明，水库蓄水后，随着库水位的升高，滑体的整体稳定性安全系数逐步下降。水库蓄水至 135 m 高程后，千将坪滑坡整体稳定性安全系数为 1.216，相比蓄水前有较大幅度下降，这充分说明三峡库水侵蚀、软化前缘切层滑带，抗剪强度参数的降低导致滑坡体整体稳定性安全系数明显减小，水库蓄水成为诱发滑坡的重要外在因素。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 蓄水后滑坡的稳定性安全系数

工况	天然状态	水库蓄水			
水位	92 m	105 m	115 m	125 m	135 m
安全系数	1.417	1.362	1.336	1.283	1.216

表 2 强降雨作用下滑坡的稳定性安全系数

工况	天然状态	蓄水至 135 m（W_{135}）	蓄水+降雨（$W_{135}+\gamma_{0.1}$）	蓄水+降雨（$W_{135}+\gamma_{0.2}$）
安全系数	1.417	1.216	1.027	0.998
蓄水和降雨联合作用/%	—	14	27	30

3.3 蓄水和降雨联合作用对滑坡稳定性的影响

千将坪滑坡发生在强降雨（6 月 21 日～7 月 11 日，沙镇溪地区总降雨量为 162.7 mm）及三峡水库第一期 135 m 高程蓄水一个月后。为了探讨强降雨对滑坡稳定性的影响，分析了不同地下水压力作用下滑坡的稳定性安全系数，降雨后地下水位的处理采用在滑面上统一输入地下水位系数分别为 $\gamma_{0.1}$ 和 $\gamma_{0.2}$ 的地下水压力方式，相当于滑体内水柱高度为岩条高度的 10%和 20%，坡外水位采用 135 m 蓄水位。

表 2 给出了不同地下水压力作用下滑坡的稳定性安全系数及其随地下水位上升而下降的百分比。计算成果表明，水库蓄水至 135 m 高程后，在连续降雨条件下，坡体内地下水位逐级升高，当地下水位系数为 0.1 时，滑体整体稳定性安全系数减小为 1.027，基本处于极限平衡状态；随着降雨强度的增大，滑体安全系数继续减小，当地下水位系数达到 0.2，此时滑体安全系数小于 1，导致发生滑坡。显然，水库蓄水使滑坡稳定性条件恶化，连续降雨作用最终触发了滑坡。

4 结　论

千将坪滑坡三维极限平衡分析成果表明，在自然状态下千将坪滑坡是满足整体稳定性要求的；水库蓄水后，由于三峡库水侵蚀、软化前缘切层滑带，使得千将坪滑坡整体稳定性安全系数相比蓄水前有较大幅度下降（减小了 0.2），水库蓄水成为诱发滑坡的重要外在因素。水库蓄水至 135m 高程，在连续降雨条件下，坡体内地下水位逐级升高，当地下水位达到滑体厚度的 0.2 倍时，滑体发生失稳破坏。显然，水库蓄水和强降雨的联合作用最终导致千将坪滑坡产生大规模深层滑动。

参考文献：

[1] 肖诗荣,等. 三峡库区秭归县千将坪滑坡工程地质勘查报告[R]. 宜昌: 三峡大学, 2005.

[2] 刘得富, 罗先启, 郑　宏,等. 三峡库区水库型滑坡预测评价及防治研究报告[R]. 宜昌: 三峡大学, 2005.

[3] 殷秋林、李　晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J].岩石力学与工程学报,2005,**24**(17):3146－3153

[4] 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.

[5] JIANG Q H, M YEUNG Ronald, WANG Xiao-hai, FENG Ding-xing. Development of the interactive visualization system for three dimensional slope stability analysis[C]// The 9th Congress of the International Association of Engineering Geology, African, 2002.

[6] 汪华斌,徐瑞春,姜清辉. 鱼洞河滑坡稳定性三维极限平衡分析[J]. 山地学报,2002, **20**(4), 497－501.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net