

三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价

胡新丽¹, David M. Potts², Lidija Zdravkovic², 王亮清¹

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 帝国理工学院土木系, 英国伦敦 SW72AZ

摘要: 三峡水库运行后, 水库水位每年将在 145 m ~ 162 m ~ 175 m 间波动, 库水位的浸泡软化作用及水位升降引起的地下水位的波动将会降低库岸岩土体的抗剪强度, 影响已有滑坡的稳定性。因此, 在实际水库运行条件下滑坡的稳定性是目前迫切需要研究的重要课题。针对库区大型复杂滑坡——金乐滑坡, 分析了该滑坡的工程地质条件和形成机制; 建立了二维有限元计算模型并选择合理的岩土力学参数; 利用英国帝国理工学院 ICFEP 有限元软件, 依据水库实际运行曲线, 在一年时间内分 7 种不同的模拟状态进行了模拟。结果表明: (1) 金乐滑坡在天然状态下处于稳定状态; (2) 库水位上升状态下, 滑坡前缘稳定性较相应的稳定水位状态较好; (3) 水位下降状态, 滑坡前缘将出现破坏, 特别是 162 m 下降至 145 m 时, 滑坡前缘出现破坏, 存在中前部渐进破坏的可能; (4) 金乐滑坡变形破坏形式为牵引渐进式, 在一个水位波动周期内不存在整体滑移的危险。建议对滑坡前缘进行治理。

关键词: 库水位波动; 金乐滑坡; 有限单元法; 变形破坏。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2007)03-0403-06

收稿日期: 2007-03-19

Jinle Landslide Stability under Water Level Fluctuation of Three Gorges Reservoir

HU Xin-li¹, David M. Potts², Lidija Zdravkovic², WANG Liang-qing¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Civil Engineering Department, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London SW72AZ, England

Abstract: After the operation of Three Gorges reservoir, the water level of the reservoir will fluctuate in the range of 145 m – 162 m – 175 m. Water level fluctuation will soften the rock and soil on the bank and induce the underground water fluctuation and decrease the shear strength, which will influence the landslide stability. Therefore, landslide stability evaluation under the reservoir running is necessary and important. Jinle landslide is one of the large and complicated landslides in this area. Based on the engineering geological condition investigation results, the formation mechanism is analyzed. The 2D finite element model is developed and the rational calculation parameters of the rock and soil are chosen. With ICFEP software, 7 simulations are done according to the reservoir run curve. The results show that: (1) in the natural state, Jinle landslide is stable; (2) when the water level is impounding, the stability of the landslide front edge is better than the corresponding stable water levels; (3) when water level falls, the front edge of the landslide will fail, especially when the water level drops rapidly from 162 m to 145 m the front edge of the landslide will fail, meanwhile it is possible subject to progressive failure in the front and middle parts of the landslide; (4) the deformation and failure of the Jinle landslide is pulling and progressive failure mode. During the first water level fluctuation period, the whole landslide can stay stable. The front part of this landslide should be improved.

Key words: water level fluctuation of reservoir; Jinle landslide; finite element method; deformation and failure.

三峡工程正常运行后, 库水位每年将在 145 m ~ 162 m ~ 175 m 之间周期性波动。库水位的浸泡软

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40202028); 中国地质调查局“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评价”项目 (No. 1212010640604)。

作者简介: 胡新丽(1968—), 女, 博士, 副教授, 从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治设计教学与科研工作。E-mail: huxinli@cug.edu.cn

化作用及水位升降引起的地下水位的波动将会降低库岸岩土体的抗剪强度,影响岸坡和已有滑坡的稳定性。

近年来,人们除利用极限平衡理论、考虑水土耦合的数值模拟研究水库水位上升(Muller, 1964; Breth, 1967; 刘才华等, 2005)对滑坡的稳定性影响外,对水位下降条件下的滑坡稳定性进行了深入的研究(柴军瑞和李守义, 2004; 廖红建等, 2005; 刘新喜等, 2005; 唐辉明和章广成, 2005),更加重视水位的波动对滑坡稳定性的影响(朱冬林等, 2002; Franco and Claudio, 2003; 丁秀丽等, 2004; 胡新丽等, 2006)。水位波动主要考虑 145 m 水位直接升至 175 m 水位,对三峡水库运行条件下的水位实际波动研究很少。

本文选择三峡库区兴山县金乐滑坡为研究对象,利用英国帝国理工学院 Potts 教授研制开发的岩土工程有限元软件,考虑应力场和渗流场耦合作用(Hu, 2005),在充分分析金乐 I 号滑坡工程地质条件的基础上,依据三峡水库水位波动的实际运行条件,评价滑坡变形规律及滑坡稳定性,为滑坡地质灾害的治理设计工作提供参考。

1 金乐滑坡工程地质条件及形成机制

1.1 工程地质条件

金乐滑坡位于湖北省兴山县高阳镇南约 5 km 的香溪河左岸金乐村的杨家院—金乐湾的斜坡中部及下部。滑坡 I 由标高约 300 m 以上和以下 2 个主滑方向不同的滑坡构成。I 号滑坡上段平面面积约 $21.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,总体积约 $894 \times 10^4 \text{ m}^3$; I 号滑坡下段平面面积约 $14.05 \times 10^4 \text{ m}^2$,总体积约 $380 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。I 号滑坡上下两段为呈长舌型、长轴方向夹角近 90° 的滑坡,其中 I 号滑坡上段,主滑方向约 220° 。I 号滑坡下段,在平面上为自东向西倾的狭长形状,主滑方向约 282° 。两滑坡现状均处于基本稳定状态。当三峡水库蓄水后,由于河水对滑坡体和滑带的浸润、冲蚀及库岸再造等作用,有可能使 I 号滑坡下段前缘首先坍塌失稳,引发该滑坡后缘和 I 号滑坡上段整体滑移变形。因此,本文主要研究金乐 I 号滑坡下段在实际库水位波动条件下的稳定性及变形破坏规律。

I 号滑坡下段(图 1)滑体平均厚度 27.00 m。主滑方向约 284° 。后缘切割 I 号滑坡上段的剪出带,



图 1 金乐滑坡平面图

Fig. 1 Jinle landslide photo

其分布高程 300 ~ 320 m;前缘高程 140 m。前缘地形较陡,坡角一般多在 $35^\circ \sim 57^\circ$ 之间。在纵向上,于标高 240 ~ 260 m 分布一狭条状凹地,其宽度 20 ~ 30 m。凹地以东,地形倾向北西西—西,倾角 $35^\circ \sim 50^\circ$;凹地以西,地形向东倾,倾角 $16^\circ \sim 38^\circ$ 。I 号滑坡下段,滑体厚 11.90 ~ 56.05 m,以滑坡中部最厚,近前缘剪出带为 24.60 m,后缘的厚度为 11.90 ~ 27.40 m;滑坡南、北两侧厚度较薄,为 3.20 ~ 19.80 m。横剖面方向上,以滑体中部最厚,南、北两侧向中部倾斜,呈“锅底”状。滑坡东西向长度 768.00 m,南北向平均宽度 183.00 m(图 2)。

I 号滑坡下段滑体的东部,主要为灰黄、灰绿细砂岩及紫红色泥质粉砂岩组成的碎、块石;滑体西部,主要由灰黄、灰白、灰绿色长石砂岩、细砂岩和紫红色泥质粉砂岩构成的碎、块石夹粉质粘土组成。I 号滑坡下段滑带土主要由可塑状紫红色及灰绿色含砾粉质粘土组成,厚 0.40 ~ 3.50 m。主滑面在纵向上,自东向西倾,坡角 $10^\circ \sim 30^\circ$,平均 23.3° 。该滑坡的滑床,主要由灰黄、青灰色强—中等风化的长石砂岩及紫红色泥质粉砂岩构成。

1.2 滑坡形成机制分析

金乐滑坡区后缘分布着顺向长石石英砂岩, I 号滑坡前缘坡陡临空,在降雨及该滑坡上段不断加载作用下,滑坡下段整体失稳。进而金乐滑坡上段滑移,堆载于下段滑体之上,构成上段滑动伴生的堆积物覆盖下段滑坡的势态。

金乐滑坡的孕育与发展的变形模式,主要经历以下 4 个阶段:多次崩塌的碎块石土和坡残积土顺坡堆积,逐渐累增、加载→滑动能量逐渐积累,斜坡平衡条件逐渐被破坏,斜坡土石体向失稳方向发展,

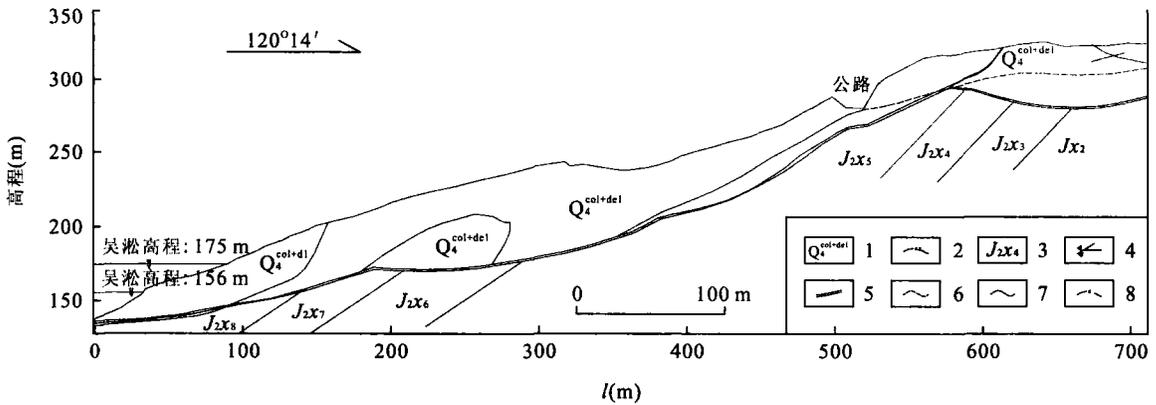


图 2 金乐滑坡剖面图

Fig. 2 Jinle landslide

- 1. 第四系崩坡积层; 2. 中风化底界线; 3. 侏罗系中统下砂溪庙组(2~8 段岩性组); 4. 地下水位线; 5. 滑带; 推测地质界线; 7. 地质界线; 8. 强风化底界线.

加之地壳不断抬升, 香溪河下切作用加强, 临空面进一步发育, 滑坡变形的边界条件逐渐完备→上部崩滑激发或大雨, 尤其是连降大、暴雨激发, 使滑坡体下部饱水, 坡体下段自然平衡状态完全被破坏, 引发滑坡变形→下段滑坡的滑移, 在后缘形成临空面, 进而导致滑坡上段的下部堆积体滑移变形, 致使滑坡下段滑坡后缘为滑坡上段堆积物掩覆与改造。

金乐滑坡下段滑坡与上段滑坡体表现为既具独立性, 彼此又具密切的关联性。由于两滑坡重叠段的碎石土物质多年的自重压实和地表水的淋漓入参与风化等作用产物的充填, 使上、下段滑体在结构上存在紧密相关性。

三峡水库运行后, 在库水位及其波动条件下, 金乐下段滑坡一旦出现整体失稳, 有可能引发滑坡体的整体变形失稳。

2 数值模拟模型和模拟方法

利用数值模拟方法研究滑坡的稳定性, 除根据地质条件和设计方案建立合理的数值计算力学模型外, 还必须确定合理的水位波动的模拟方法, 包括水位波动的模拟以及参数的合理选取。

2.1 力学模型的建立

根据地质条件分析, 选择主滑剖面, 建立了二维地质力学模型。其左右边界为水平约束, 下边界为竖向约束边界。其有限元计算网格剖分图如图 3。

2.2 水库运行曲线和模拟方案

水库正常蓄水位 175 m, 初期蓄水 156 m。2003 年 6 月, 水位由 82.28 m 到 135 m。2006 年 9 月, 升

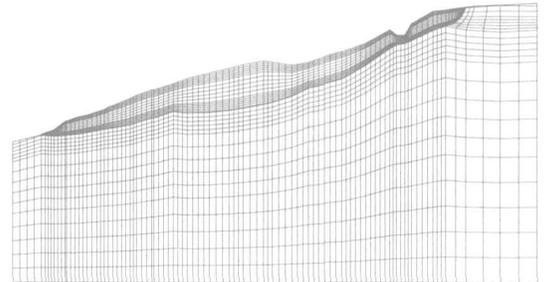


图 3 二维数值模拟网格剖分图

Fig. 3 2D numerical simulation meshes

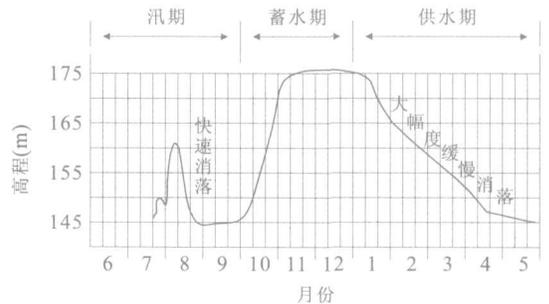


图 4 水库水位运行曲线

Fig. 4 Reservoir water-level running curve

高到 156 m。工程运行时, 每年将在 145 ~ 175 m 之间周期性升降变化。其运行曲线见图 4。

根据上述水库运行曲线, 为研究水库运行条件下滑坡的稳定性, 我们确定以下模拟方法, 即: 从汛期最低稳定水位开始模拟, 波动周期时间一年。根据实际水库运行曲线, 模拟的水位及其变动情况依次为: (1) 145 m 稳定水位, 保持时间为 0.111 年; (2)

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the model

参数	弹性模量(MPa)	泊松比	密度($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力(kPa)	摩擦角($^{\circ}$)	渗透系数($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)
滑床基岩	1.48×10^4	0.22	26.0	2500	34.0	30.9
I 滑坡下段滑体	10.0	0.25	21.1	42	26.0	1.085
I 号滑坡上段滑体	10.0	0.25	21.8	45	26.0	30.9
滑带	8.5	0.25	21.1	28	24.0	0.1084

145 m 升至 175 m 水位, 历时 0.083 年; (3) 175 m 稳定水位, 保持时间为 0.167 年; (4) 175 m 降至 145 m, 历时为 0.333 年, 模拟水位大幅度缓慢消落; (5) 145 m 稳定水位, 保持时间 0.25 年; (6) 145 m 水位升至 162 m 水位, 历时 0.028 年; (7) 162 m 水位降至 145 m 水位, 历时 0.028 年。

计算软件采用英国帝国理工学院研制开发的有限元 ICFEP, 该软件可进行渗流场和应力场的耦合计算. 选取适合岩土体摩尔库伦本构模型, 进行二维有限元模拟分析。

2.3 岩土体及桩体物理力学参数

根据岩土工程实验和桩的设计资料, 确定模拟的岩土体及桩体物理力学参数(表 1)。

3 数值模拟成果分析

3.1 天然状态下滑坡稳定性分析

在天然状态下滑坡体处位移受自重应力场影响, 位移主要指向下. 从图 5a 可见, 在滑坡后部公路陡坎附近, 滑带出现局部塑性应变, 但滑坡整体处于稳定状态。

3.2 汛期 145 m 稳定水位条件下滑坡变形破坏分析

汛期 145 m 稳定 0.111 年后, 滑坡前缘局部位移增大, 且指向河谷方向, 但量值不大. 从增量塑性应变图(图 5a)可以看出, 在此状态下滑坡前缘及滑面均出现塑性应变, 但塑性应变区未贯通, 主要集中在滑坡中前部滑带处. 滑坡稳定性较天然状态降低, 但仍处于稳定状态。

3.3 蓄水期 145 m 升至 175 m 水位滑坡变形破坏分析

蓄水期 145 m 升至 175 m 水位, 共历时 0.083 年. 当水位升至 175 m 水位时, 滑坡前缘位移指向坡内. 从增量塑性应变图(图 5b)可以看出, 在此状态下滑坡前缘滑体及前缘滑面塑性应变区明显减小, 塑性应变区主要出现在中部. 滑坡稳定性较汛期

145 m 稳定态有所提高。

3.4 蓄水期 175 m 稳定水位

蓄水期水库将在 175 m 水位保持 0.167 年. 此时, 滑坡渗流场处于基本稳定状态. 地下水渗流指向坡外. 受其影响滑坡体整体位移指向坡外, 但量值不大. 从增量塑性应变图(图 5c)可以看出, 在此状态下滑坡塑性应变区明显增大, 塑性应变区主要出现在中前部, 未贯通. 滑坡稳定性较水位上升期下降. 与 145 m 稳定水位相比, 滑面塑性区增大, 但前缘滑体塑性区减小. 说明滑坡前缘较 145 m 稳定性提高, 但滑坡整体稳定性稍差。

3.5 供水期水位 175 m 降至 145 m

供水期, 水库将从 175 m 大幅度缓慢消落至 145 m, 历时 0.333 年. 此时, 滑坡渗流场指向坡外. 受其影响滑坡体整体位移指向坡外, 在滑坡前缘局部区域位移明显增大(图 5d). 从增量塑性应变图可以看出, 在此状态下滑坡前部塑性应变区明显增大, 在前缘形成局部贯通面. 说明滑坡前部将产生局部破坏. 但滑坡整体还处于基本稳定状态。

3.6 供水期至汛期 145 m 稳定水位

供水期至汛期, 水库将在 145 m 水位保持 0.25 年. 此时, 滑坡渗流场持续指向坡外, 地下水位持续下降, 并趋于稳定状态. 此时, 滑坡前缘位移逐步减小, 但前缘局部量值仍较其他区域大, 但量值较前一状态小. 从增量塑性应变图(图 5e)可以看出, 在此状态下滑坡前部塑性应变区明显减小, 但滑带塑性区增大, 仍未完全贯通. 在前缘形成局部贯通面, 说明滑坡前部存在局部破坏的现象. 滑坡处于稳定状态, 且稳定性较 175 m 降至 145 m 稍好。

3.7 汛期水位 145 m 升至 162 m

汛期库水位从 145 m 急升至 162 m, 历时 0.028 年. 此时滑坡渗流场难以达到平衡, 表现在滑坡前缘局部区域位移指向坡内, 其他部位位移指向坡外. 从增量步塑性应变图(图 5f)可以看出, 在此状态下滑坡前部滑体塑性应变区明显减小, 但滑带塑性区仍存在. 在滑坡中前部存在一个潜在的塑性应变贯通

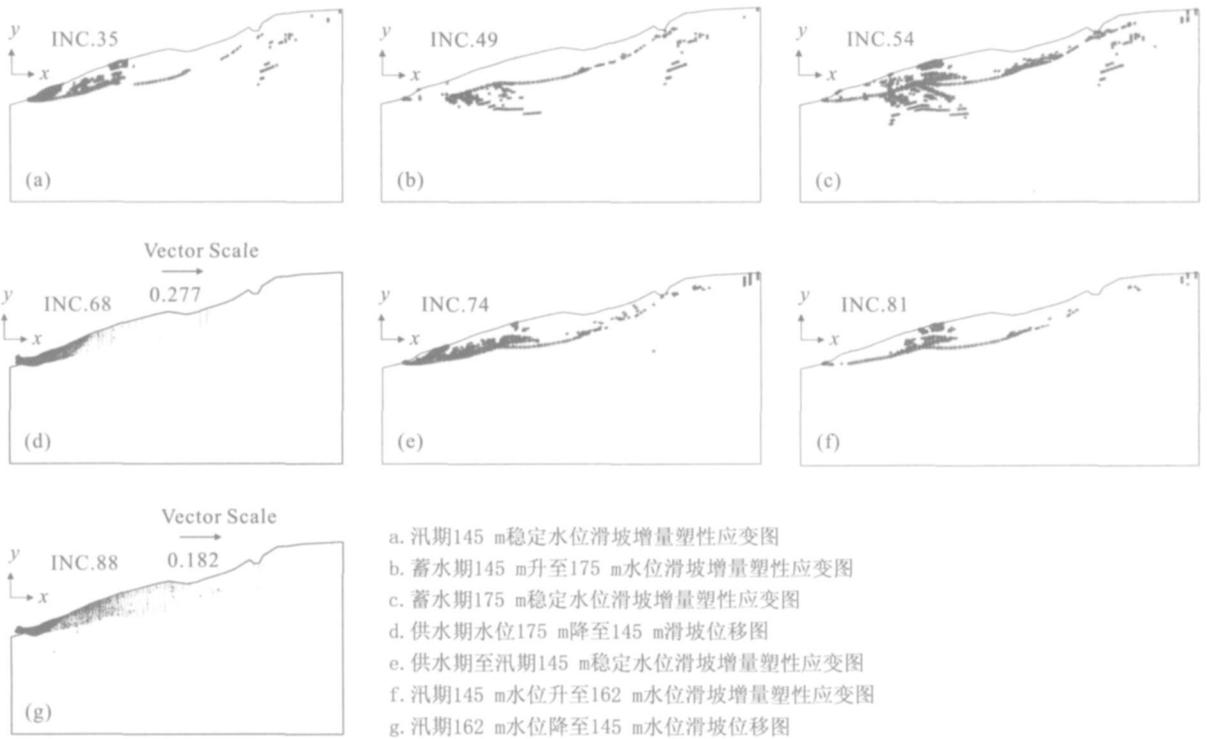


图 5 滑坡位移及塑性应变图

Fig. 5 Displacement and plastic stain of Jinle landslide

面. 说明滑坡中前部存在破坏的可能性. 但滑坡仍处于稳定状态.

3.8 汛期水位 162 m 降至 145 m

汛期库水位从 162 m 急降至 145 m, 历时 0.028 年. 此时滑坡渗流场指向坡外. 滑坡前缘位移迅速增大并指向坡外, 量值增大 (图 5g). 增量塑性应变显示在此状态下滑坡前缘出现明显塑性应变贯通面, 说明滑坡前缘将破坏. 而且中部塑性应变面基本形成, 说明滑坡存在渐进性破坏的可能. 该状态是滑坡最危险状态.

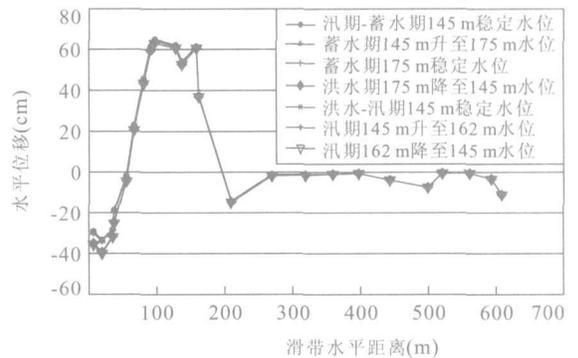


图 6 滑带水平位移图

Fig. 6 Horizontal displacement of sliding zone

4 滑坡稳定性综合分析

综上所述, 金乐滑坡在天然状态下处于稳定状态. 在汛期一蓄水期 145 m 水位时, 滑坡稳定性较天然状态降低. 蓄水期 145 m 升至 175 m 水位时, 滑坡前缘滑体及前缘滑面塑性应变区明显减小, 塑性应变区主要出现在中部. 滑坡稳定性较汛期 145 m 稳定态有所提高. 蓄水期 175 m 稳定水位时, 滑坡稳定性较水位上升期下降. 与 145 m 稳定水位相比, 滑面塑性区增大, 但前缘滑体塑性区减小. 说明滑坡前缘较 145 m 稳定性提高, 但滑坡整体稳定性稍差. 供水

期水位 175 m 降至 145 m 时, 滑坡前部将产生局部破坏, 滑坡整体稳定性较前述状态下降低, 但仍处于基本稳定状态. 供水期至汛期 145 m 稳定水位时, 滑坡前部存在局部破坏的现象. 滑坡整体处于稳定状态, 且稳定性较 175 m 降至 145 m 稍好. 汛期 145 m 水位升至 162 m 水位时, 在滑坡中前部存在一个潜在的塑性应变贯通面. 说明滑坡中前部存在破坏的可能性. 但滑坡仍处于稳定状态. 汛期 162 m 水位降至 145 m 水位时, 滑坡前缘将破坏. 而且中部塑性应变面基本形成, 说明滑坡存在渐进性破坏的可能. 该状

态是滑坡最危险状态。

金乐滑坡的变形破坏主要从前缘开始, 主要潜在变形破坏区集中在中前部, 从滑带水平位移变化(图 6)可以看出: 各水位状态下滑带前缘 50 m 范围内的位移指向坡外, 说明此范围内滑坡将首先出现破坏, 是主滑段。中前部存在渐进破坏的可能。滑坡后部滑带位移基本极小, 说明各状态下滑坡后部处于稳定状态, 滑坡产生整体破坏的可能性较小。为保证水库运行时滑坡的稳定性, 建议对滑坡前缘进行整治。

References

Breth J. H., 1967. The dynamics of a landslide produced by filling a reservoir. 9th Int. Cong. on Large Dams, Istanbul, Q32, R3: 35—45.

Chai J. R., Li S. Y., 2004. Coupling analysis of seepage and stress fields in Xietan landslide in Three Gorges region. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(8): 1280—1284 (in Chinese with English abstract).

Ding X. L., Fu J., Zhang Q. H., 2004. Stability analysis of landslide in the south end of Fengjie highway bridge with fluctuation of water level of Three Gorges reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(17): 2913—2919 (in Chinese with English abstract).

Franco M., Claudio V., 2003. Neotectonics of the Vajont dam site. *Geomorphology*, 54(1—2): 33—37.

Hu X. L., 2005. Numerical simulation on anti-slide construction effects of landslide in Three Gorges reservoir area. The Proceedings of the China-association for science and Technology. [s. l.]: [s. n.], 2(1): 139—143.

Hu X. L., Tang H. M., Ma S. Z., et al., 2006. Numerical stimulation of 3D landslide stability in Three Gorges area based on NMR. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 279—285 (in Chinese with English abstract).

Liao H. J., Sheng Q., Gao S. H., et al., 2005. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(19): 3454—3458 (in Chinese with English abstract).

Liu C. H., Chen C. X., Feng X. T., 2005. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise. *Rock and Soil Mechanics*, 26(5): 769—773 (in Chinese with English abstract).

Liu X. X., Xia Y. Y., Lian C., et al., 2005. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level. *Rock and Soil Mechanics*, 26(9): 1427—1431 (in Chinese with English abstract).

Muller L., 1964. The rock slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 2(1): 148—222.

Potts D. M., Zdravkovic L., 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. Thomas Telford London.

Tang H. M., Zhang G. C., 2005. Study on slope stability during reservoir water level falling. *Rock and Soil Mechanics*, 26(Suppl. 2): 11—15 (in Chinese with English abstract).

Zhu D. L., Ren G. M., Nie D. X., et al., 2002. Effecting and forecasting of landslide stability with the change of reservoir water level. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (3): 6—9 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

柴军瑞, 李守义, 2004. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力场耦合分析. *岩石力学与工程学报*, 23(8): 1280—1284.

丁秀丽, 付敬, 张奇华, 2004. 三峡水库涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析. *岩石力学与工程学报*, 23(17): 2913—2919.

胡新丽, 唐辉明, 马淑芝, 等, 2006. 基于 NMR 的库区滑坡三维稳定性数值模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 279—285.

廖红建, 盛谦, 高石夯, 等, 2005. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响. *岩石力学与工程学报*, 24(19): 3454—3458.

刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 2005. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究. *岩土力学*, 26(5): 769—773.

刘新喜, 夏元友, 练操, 等, 2005. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究. *岩土力学*, 26(9): 1427—1431.

唐辉明, 章广成, 2005. 库水位下降下的边坡稳定性研究. *岩土力学*, 26(增刊 2): 11—15.

朱冬林, 任光明, 聂德新, 等, 2002. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测. *水文地质工程地质*, (3): 6—9.