

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2798-05

基于滑体渗透性与库水变动的滑坡 稳定性变化规律研究

宋 琨¹, 晏鄂川^{1,2}, 朱大鹏¹, 赵庆远¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2. 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 在三峡工程试运行期间, 库区滑坡因地质结构和渗透性的不同, 其变形情况存在明显差异, 因此, 除研究滑坡地质结构外, 还应加强不同渗透性滑坡在库水变动下的稳定性响应规律研究。以三峡水库库首区黄荆树滑坡实例为计算模型, 分析库水位在 175~145 m 间以 0.5~2.0 m/d 变化时 4 种不同渗透性滑坡的渗流场特征; 再以库水影响系数 α 和稳定性变化率 β 为评价指标, 研究在滑体渗透性和库水变动条件下的滑坡稳定性变化规律。研究表明, 当库水影响系数 α 在-0.107~-0.322 时, 稳定性变化率 β 最大, 且随 α 减小滑坡稳定性增加率 β 减小; 当 α 在-0.644~-769.231 时, 随 α 减小稳定性增加率 β 变化不明显; 当 α 在 576.923~769.231 时, 库水位上升时滑坡稳定性降低较少; 当 α 在 0.107~384.615 时, 影响系数 α 与稳定性变化率 β 的相关性不明显。其结果对于库区滑坡的监测预警有较强的应用价值。

关 键 词: 水位变化; 渗透性; 水库滑坡; 库水影响系数; 稳定性变化率

中图分类号: P 642

文献标识码: A

Base on permeability of landslide and reservoir water change to research variational regularity of landslide stability

SONG Kun¹, YAN E-chuan^{1,2}, ZHU Da-peng¹, ZHAO Qing-yuan¹

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

2. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: During the trial operation of the Three Gorges Project, there are remarkable differences between the deformation of landslides due to different geological conditions and permeabilities. Therefore, besides the geological structure, more attention should be paid to study the regularity of stability variation of different permeability landslides under the condition of reservoir level change. Taking the Huangjingshu landslide at the head area of the Three Gorges as the computation model, the seepage field of 4 landslides with different permeabilities are studied as the water level changes at a steady speed from 0.5 m/d to 2.0 m/d. As the evaluation index, reservoir water influence coefficient, the ratio of water level change speed to permeability coefficient, and stability change ratio is proposed. And the regularity of stability variation is obtained under the condition of permeability and water level change. The results show that when the reservoir water influence coefficient α changes from -0.107 to -0.322, the stability change ratio β is the largest; and the β decreases as α reduces. When α changes from -0.644 to -769.231, the β almost unchanged as α decreased. When α changes from 576.923 to 769.231, the reservoir filling had less effect on the landslide stability. When α changes from 0.107 to 384.615, the correlation of α and β is not obvious. It has some values for the landslide monitoring and warning in the Three Gorges reservoir area.

Key words: reservoir level change; permeability; reservoir landslide; reservoir water influence coefficient; rate of stability change

1 引 言

在许多发展中国家滑坡灾害导致的人员伤亡和经济损失可达到国民生产总值 (GNP) 的 1%~

2%^[1]。United Nation University 在 2006 年公布的研究成果表明, 亚洲在 20 世纪遭受 220 次灾难性滑坡灾害——是目前世界上最严重的地区^[2]。我国也是世界上滑坡灾害最严重的国家之一^[3]。

收稿日期: 2010-04-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2011CB710605); 三峡库区三期地质灾害防治监测预警工程项目(No. SXJC-3ZH1D1_合[2009]003)。

第一作者简介: 宋琨, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要研究方向为岩土体稳定性评价与防治。E-mail: songkuncug@yahoo.cn

自三峡工程兴建以来,国内外学者对三峡库区的滑坡灾害开展了大量、持续的研究工作,尤其是库水波动对库区滑坡稳定性的影响。如廖红建等^[4]探讨了库水下降期间滑坡体稳定性随水位下降速度的变化情况;刘新喜等^[5-6]研究了三峡水库水位不同下降速度和降雨条件下红石包滑坡的稳定性变化;章广成^[7]通过 ANSYS 模拟研究了三峡水位变化对赵树岭滑坡稳定性的影响;郑颖人等^[8],宋琨等^[9]通过解析方法,探讨了滑坡中浸润线的变化规律;Zhang 等^[10]通过模型试验和数值试验研究了库水位下降时层状斜坡中的地下水变化特征和斜坡应力场和位移场特征;Deng 等^[11]通过布置于泄滩古滑坡体的自动水文监测系统,研究了在三峡水库蓄水条件下滑坡体中地下水的变化特征;Wang 等^[12]通过研究三峡库区树坪滑坡(Shuping landslide)2004年8月至2007年7月的监测资料得到水位下降对滑坡的变形影响最大。

目前,对三峡库区滑坡在库水影响下的稳定性变化研究,主要针对某一滑坡采用数值模拟、模型试验和监测等手段研究地下水变化特征和库水变化(尤其是库水位下降)对滑坡稳定性和变形的影响。而对滑坡因渗透性的不同而导致其稳定性对库水影响不同的研究较少。如何评价具有不同渗透性的滑坡在库水位变动情况下的稳定性状况,揭示二者之间的变化规律。这对三峡工程的正常运营以及库区滑坡监测预警工程具有指导意义。

本文以三峡库区黄荆树滑坡地质结构为模型,在得出4种不同渗透特征滑坡在8种库水位变化方案下(下降、上升各4种)渗流场的基础上,以库水影响系数 α 和稳定性变化率为评价指标,研究不同影响系数下的滑坡稳定性变化规律。

2 黄荆树滑坡基本特征

黄荆树滑坡位于三峡库区秭归县水田坝乡吒溪河右岸,为一堆积层老滑坡。平面呈扇形,后部圈椅形态明显,滑距约80 m左右。滑体高程为139~215 m,面积为 $8 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积为 $67 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向为NE65°。

滑体物质(Q^{del})主要由粉质黏土、含碎石粉质黏土、碎石土、块石组成,为二元结构,底部为含卵砾粉质黏土、砂土,厚4~19 m。滑带土由含砾粉质黏土组成,偶含碎石,厚度一般为0.2~1 m,表现为中~弱透水性特征。滑床岩性主要为崩积层($Q^{\text{col+dl}}$),局部为阶地相冲洪积地层($Q^{\text{pl+al}}$),含砾粉质黏土、砂土、卵石层,厚度7.00~16.44 m,透

水性较好。最下部为基岩(J_{3p}),由粉砂质泥岩、长石石英砂岩组成,一般埋深17.00~30.43 m,透水性差。该滑坡的滑动面形态较平缓。其典型地质剖面如图1所示。

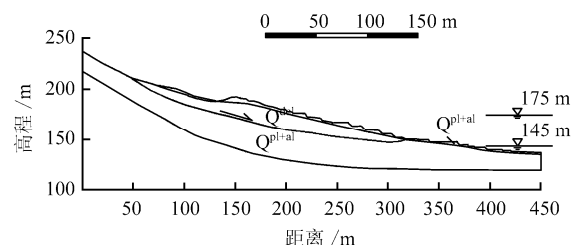


图1 黄荆树滑坡典型工程地质剖面
Fig.1 Geological profile of Huangjingshu landslide

除地质结构、岩性以及地形外,滑坡区的水文地质条件是影响该滑坡稳定性的重要因素。区内的地下水与库水位存在密切的水力联系,因此,库水位的波动将影响该滑坡的稳定性状况。

3 不同渗透性滑坡渗流场特征

库水位变化速度不同、不同渗透性滑坡的渗流场特征不同,则稳定性状态变化亦不同。

在此以黄荆树滑坡地质模型为原型,在滑体由同一均质土层组成的假设条件下,建立如图2所示的概化计算模型,研究不同渗透特征滑坡在不同库水变化速度下的渗流场特征。

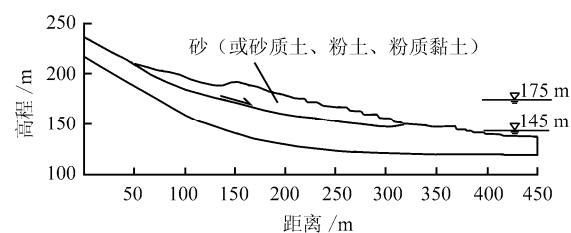


图2 概化计算模型图
Fig.2 Generalized calculating model

结合三峡库区堆积层滑坡滑体饱和渗透系数多在 $10^{-3} \sim 1 \text{ m/d}$ 量级变化的统计特征和水位调度方案,采用如表1所示的试验方案,研究库水位变化下不同渗透性滑坡的渗流场特征。其中,滑体饱和渗透系数在 $10^{-3} \sim 10 \text{ m/d}$ 区间内类比砂、砂质土、粉土和粉质黏土等,水位变化速度分别为 ± 0.5 、 ± 1.0 、 $\pm 1.5 \text{ m/d}$ 和 $\pm 2.0 \text{ m/d}$ 。

试验方案中所采用的土体非饱和特征参数——土-水特征曲线和渗透函数曲线主要根据加拿大

Saskatchewan 大学的研究成果^[13]。

表 1 数值试验方案

Table 1 Numerical test scheme

滑体物质	渗透系数 $K/(m/d)$	库水位变化速率 $v^*/(m/d)$
砂	4.660 0	
砂质土	0.506 0	下降: -0.5, -1.0, -1.5, -2.0
粉土	0.021 6	上升: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
粉质黏土	0.002 6	

注: 库水位下降为负, 上升为正。

模型的水力初始条件分别为 145 m 水位 (库水上升时) 和 175 m 水位 (库水下降时) 时的稳定渗流场。水力边界借用黄荆树滑坡边界条件, 即滑坡地表 175 m 高程下为动水头边界 (水头随库水位以不同速度在 145~175 m 间变化), 其余为流量 $Q=0$ 边界。

根据非饱和渗流原理, 利用加拿大 GEO-SLOPE 公司开发的 Geostudio2004 的 SEEP/W 模块得到不同渗透性滑坡的渗流场。

图 3 为库水位上升速度为 0.5 m/d 时渗透系数 $K=0.021\ 6\ m/d$ 的滑坡的渗流场。为清楚显示, 图中只绘出了部分时刻的浸润线。图中滑坡浸润线随库水位上升, 出现明显的“弯曲”, 即坡体中地下水相对库水位存在明显滞后效应, 仅在坡面附近局部范围内存在“同步现象”。

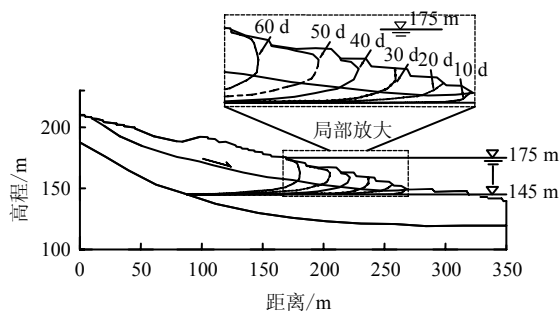


图 3 $K=0.021\ 6\ m/d$ 时渗流场 ($v=0.5\ m/d$)

Fig.3 The seepage field of $K=0.021\ 6\ m/d$, $v=0.5\ m/d$

图 4 为库水位下降速度为 0.5 m/d 时不同渗透性滑坡在库水位下降至 145 m 时渗流场特征。从图中可以看出, 渗透系数越大, 浸润线越低 (砂明显大于粉质黏土), 坡体中的地下水越容易排出。

4 滑坡稳定性响应变化

在库水位变化时, 滑坡稳定性如何变化和稳定性系数变化多少是工程人员最关心的, 也是对工程最有意义的。

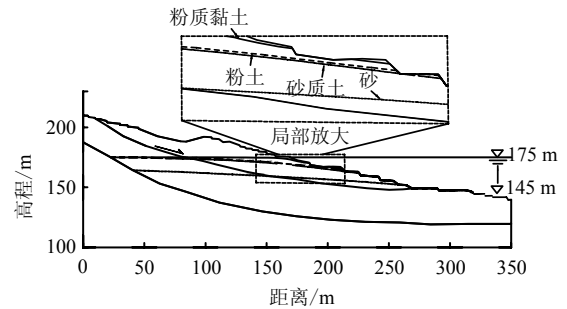


图 4 水位降至 145 m 时不同滑体渗流场 ($v=0.5\ m/d$)

Fig.4 The seepage fields of the water level lowering to 145 m ($v=0.5\ m/d$)

4.1 稳定性计算参数

根据室内和现场试验, 并结合参数反演, 确定该滑坡的计算参数如表 2 所示。

表 2 滑坡稳定性计算参数

Table 2 Calculation parameters of landslide stability

	$\gamma/(kN/m^3)$		c/kPa		$\varphi/(^\circ)$	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
滑体	17	19				
滑带			21	20	14	12

4.2 评价指标

为研究不同渗透性滑坡随库水位的响应变化规律, 提出库水影响系数 (库水变化速度与渗透系数的数值之比) 评价库水对滑坡稳定性的影响。

库水影响系数 α 定义为

$$\alpha = \frac{v}{K} \quad (1)$$

式中: α 为无量纲系数; v 为库水位变化速度 (m/d), 上升为正, 下降为负; K 为滑体渗透系数 (m/d)。稳定性变化率 β 为

$$\beta = \frac{\Delta F_s}{F_{s0}} \times 100\% \quad (2)$$

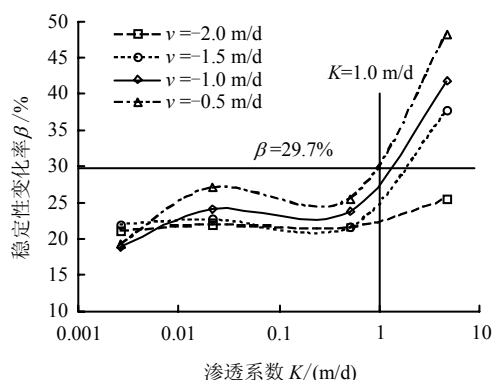
式中: F_{s0} 为初始水位下的滑坡整体稳定性系数, 分别为下降过程的 175 m 水位下整体稳定性系数和上升过程的 145 m 水位下的整体稳定性系数。稳定性计算采用 Morgenstern-Price 法; ΔF_s 为稳定性系数变化值, $\Delta F_s = F_{si} - F_{s0}$, 稳定性提高为正, 降低为负; F_{si} 为库水位变化至某一时刻的滑坡整体稳定性系数。

4.3 稳定性响应变化

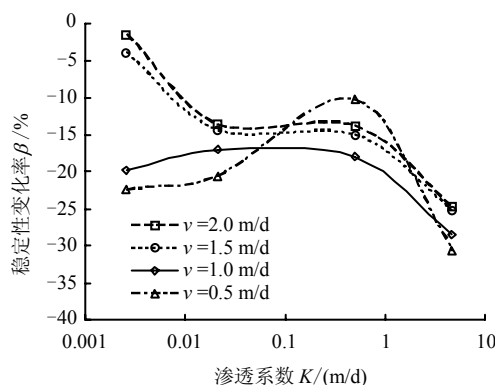
图 5 为库水位在 175~145 m 间变化时, 稳定性变化率随渗透系数的变化曲线。

从图 5(a)可以看出, (1) 库水位下降至 145 m 时, 4 条曲线的总体趋势是上升, 即随滑体渗透系

数增大, 滑坡的稳定性变化率增加; (2) 库水位下降速度较大 ($v=2.0 \text{ m/d}$) 时, 曲线基本水平, 即不同渗透性的该类型滑坡的稳定性变化不明显; (3) 库水下降速度较小 ($0.5 \leq v \leq 1.5 \text{ m/d}$) 时, 滑体渗透性不同, 稳定性对库水的响应不同: 渗透系数 $K < 1.0 \text{ m/d}$ 时, 稳定性变化率小于 30%, 且曲线的变化不明显, 不同渗透性滑坡的稳定性相对变化率最大为 8.12%, 即对弱透水性滑坡, 渗透系数的改变对滑坡稳定性的影响不明显; 渗透系数 $K > 1.0 \text{ m/d}$ 时, 稳定性变化率较大, 即对强透水性滑坡, 渗透系数越大对滑坡稳定性影响越明显。



(a) 库水位由 175 m 降至 145 m 时



(b) 库水位由 145 m 升至 175 m 时

图 5 滑体渗透性对稳定性的影响

Fig.5 Influence of permeability on the stability

从图 5(b)可以看出, ①库水位上升速度较小 ($v \leq 1.0 \text{ m/d}$) 时, 随滑体渗透系数增大, 滑坡稳定性变化率先增大后减小, 且库水位变化速度越小, 曲线波动越明显, 渗透系数对滑坡稳定性的影响越强烈; ②库水位上升速度 $v > 1.0 \text{ m/d}$ 时, 曲线分成斜率不同的 3 段: $K < 0.0216 \text{ m/d}$ 的陡降段、 $0.0216 \leq K \leq 0.506 \text{ m/d}$ 的平稳变化段和 $K > 0.506 \text{ m/d}$ 的陡降段。即随渗透系数增大, 滑坡稳定

性变化率先减小再稳定再减小, 且减小速率较大。

三峡水库水位由 175 m 下降至 145 m 时, 不同影响系数下, 滑坡稳定性变化率曲线如图 6 所示。

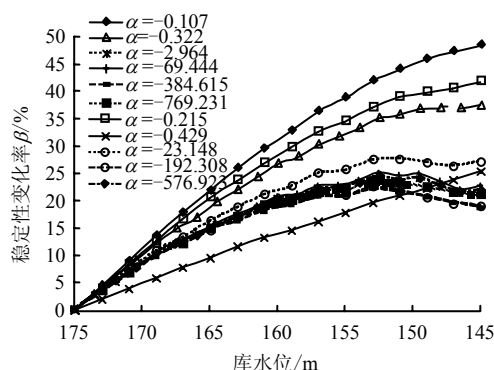


图 6 库水位下降时滑坡稳定性变化曲线

Fig.6 Curves of stability change with the water descend

从图 6 可以看出, ①随库水位下降曲线的整体趋势上升, 仅少量曲线在降至 145m 水位时出现向下弯曲。说明对该种地质结构特征的滑坡, 随库水位下降, 不同渗透性的滑坡的稳定性提高, 其原因主要在于地下水的静水压力作用; ②变化曲线明显分成 3 簇 (组)。影响系数 $\alpha = -0.107$ 、 $\alpha = -0.215$ 和 $\alpha = -0.322$ 的 3 条曲线为 A 组, $\alpha = -0.429$ 的曲线为组 B, 其余曲线为组 C 组。A 组曲线显示: 随库水位下降, 滑坡稳定性变化率 β 变化较大, 最大分别为 48.36%、41.67%和 37.61%, 不同曲线的差别也较明显; B 组曲线近似呈一直线, 表明当 $\alpha = -0.429$ 时, β 近似呈线性增加, 其斜率约为 0.85; C 组曲线之间差别不明显, 在水位为 153~149 m 间曲线出现拐点, β 值最大, 随水位下降, β 值减小; ③影响系数 α 在 $-0.107 \sim -0.322$ 之间, 随 α 减小 β 减小, 即影响系数减小, 滑坡稳定性系数增加率减小。

图 7 为库水位由 145 m 上升至 175 m 时, 不同影响系数下, 滑坡稳定性变化率曲线。从图中可以看出, ①库水位上升, 曲线下降, 说明库水位上升, 不同渗透性的该类型滑坡稳定性降低, 主要是地下水对滑坡前部的浮托减重, 降低阻滑段的抗滑力。库水上升前 15 m (水位至 160 m), 所有滑坡稳定性变化率 β 大于 -10% 。②变化曲线分成 2 簇 (组), 图中最上面两条为 1 组 ($\alpha = 576.923$ 和 $\alpha = 769.231$), 其余为另 1 组。影响系数 $576.923 \leq \alpha \leq 769.231$ 时, 曲线基本水平, 175 m 水位时的稳定性变化率 β 最小为 -5.7% , 即此时库水位上升对该类滑坡的稳定性降低较少; 当 $0.107 \leq \alpha \leq 384.615$ 时, 曲线间差别不明显, 且影响系数 α

与稳定性变化率 β 的相关性不明显。

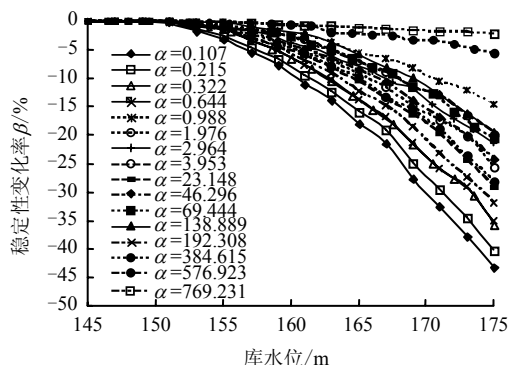


图7 库水位上升时滑坡稳定性变化曲线

Fig.7 Curves of stability change with the water level raise

5 结 论

(1) 库水位下降速度较大时, 不同渗透性的该类型滑坡的稳定性变化不明显; 下降速度较小时, 滑体渗透性不同, 稳定性对库水的响应亦不同: 对弱透水性滑坡, 渗透系数的改变对滑坡稳定性的影响不明显; 对强透水性滑坡, 渗透系数越大, 对滑坡稳定性影响越明显。

(2) 库水位上升速度较小时, 随渗透系数增大, 滑坡稳定性变化率先增大后减小, 且库水位变化速度越小, 渗透系数对稳定性的影响越强烈; 库水位上升速度 $v > 1.0$ m/d 时, 随渗透系数增大, 滑坡稳定性变化率先减少再稳定再减少。

(3) 库水位下降时, 影响系数 α 在 $-0.107 \sim -0.322$ 间时, 稳定性变化率 β 最大, 且随 α 减小滑坡稳定性增加率 β 减小; α 在 $-0.644 \sim -769.231$ 间时, 随 α 减小, 稳定性增加率变化不明显。库水位上升时, 在前 15 m (水位至 160 m) 稳定性变化率 β 大于 -10% ; 当 α 在 $576.923 \sim 769.231$ 间时, 库水位上升对该类滑坡的稳定性降低较少; 当 α 在 $0.107 \sim 384.615$ 间时, 影响系数 α 与稳定性变化率 β 的相关性不明显。

参 考 文 献

- [1] SCHUSTER R L, HIGHLAND L M. Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere[J]. USGS Open-File Report, 2001, 1: 276.
- [2] OFDA/CRED. International disaster database[M]. Belgium: Catholic University of Leuven, 2006.
- [3] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [4] 廖红建, 盛谦, 高石夯, 等. 库水位下降对滑坡体稳定

性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (19): 56—60.

LIAO Hong-jian, SHENG Qian, GAO Shi-hang, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (19): 56—60.

- [5] 刘新喜, 夏元友, 张显书, 等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1439—1444.

LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, ZHANG Xian-shu, et al. Effects of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1439—1444.

- [6] 刘新喜. 库水位下降对滑坡稳定性的影响及工程应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.

- [7] 章广成. 水位变化对滑坡稳定性的影响研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.

- [8] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203—3210.

ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, KONG Wei-xue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203—3210.

- [9] 宋琨, 刘镇, 王磊, 等. 库水降与红层岸坡稳定性变化响应关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 306—310.

SONG Kun, LIU Zhen, WANG Lei, et al. The response research of decline of the Three Gorges Reservoir water level on the change of red beds bankslope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Supp. 2): 306—310.

- [10] ZHANG Jun-feng, LI Zheng-guo, QI Tao. Mechanism analysis of landslide of a layered slope induced by drawdown of water level[J]. Science in China Series E-Engineering & Materials Science, 2005, 48(Supp. 1): 136—145.

- [11] DENG Jian-hui, WEI Jin-bing, MIN Hong, et al. Response of an old landslide to reservoir filling: A case history[J]. Science in China Series E-Engineering & Materials Science, 2005, 48(Supp. 1): 27—32.

- [12] WANG Fa-wu, ZHANG Ye-ming, HUO Zhi-tao, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China[J]. Landslides, 2008, 5(3): 321—329.

- [13] JOHN KRAHN. Seepage modeling with SEEP/W (1st edition) [M]. Canada: [s. n.], 2004.