文章编号：1000－7598 (2011) 12－3679－06

库水位波动条件下不同桩位抗滑桩抗滑稳定性研究

胡新丽，张永忠，李长冬，范付松

（中国地质大学（武汉） 工程学院，武汉 430074）

摘 要：水库滑坡抗滑桩治理设计工作中，桩位的合理选择直接关系到工程安全和造价。以张桓候庙园区东侧滑坡为例，在分析滑坡地质条件的基础上，依据三峡水库实际运行条件进行不同桩位滑坡变形规律及稳定性变化规律的 GeoStudio 数值模拟研究。结果表明：①库水位上升时，滑坡前缘位移减小，后缘位移增大。滑坡前缘在水位下降和最低水位时出现位移极大值；滑坡后缘在水位上升和最高水位时出现位移极大值。②对滑坡后缘位移最有效的控制桩位为位于地面高程 175 m 的下滑段接近滑坡最大推力区域的桩位Ⅰ，对前缘和中部位移最有效的控制桩位是位于距滑坡剪出口 130 m 阻滑段的桩位Ⅱ，最优桩位是桩位Ⅱ。考虑水位波动的影响，提出了对现有抗滑桩设计的设计安全系数修正方法，为水库滑坡抗滑桩设计提供参考。

关 键 词：库水位波动；抗滑桩桩位；滑坡稳定性；设计安全系数

中图分类号：TV 698.2^{+}3 **文献标识码：**A

Anti-sliding stability of different pile positions under reservoir water level fluctuation

HU Xin-li, ZHANG Yong-zhong, LI Chang-dong, FAN Fu-song

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In anti-sliding pile designing for Reservoir landslide improvement, the reasonable pile position determination is very important, which effects the engineering safety and cost. Taking Zhanghuanhoumiao east landslide for example, based on the engineering geological condition investigation and with the GeoStudio software, according to the reservoir operation curve, considering 4 different pile positions, the numerical simulations were done. The results show that: ① When water level rising up, the displacement of front edge decreases, but the displacement of back edge increases. The maximum displacement of the front edge appears during water level drawing down and lowest water level. The maximum. displacement of the back edge appears during water level rising up and the highest water level. ② The reasonable pile position for the back, front and middle of the landslide are separately Ⅰ, Ⅱ pile positions. I pile is at the 175m, which residual pushing force is maximum the best pile is Ⅱ pile position, which is 130m from the shearing out point of landslide. At last, considering the influence of the water level fluctuation, the modified method of the safety factor for the anti-sliding pile design is presented, which will be important to the anti-sliding pile design for reservoir landslide.

Key words: running condition of reservoir; anti-sliding pile position; landslide stability; design safety factor

1 引 言

抗滑桩是滑坡治理工程中常用的主要抗滑措施之一。抗滑桩具有抗滑能力强、适用条件广泛、施工安全简便，并能核实地质条件等突出优点[1]。三峡工程正常运行后，库水位每年将在 175～145 m 之间周期性波动。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，影响岸坡和已有滑坡的稳定性。也将影响已治理滑坡的稳定性。如何科学地进行水库运行条件下抗滑桩的设计，满足工程安全需要，是十分迫切的任务。

在目前的抗滑桩设计中，传统上，抗滑桩桩位的选择主要是依据滑带的形态，抗滑桩设置在滑带

收稿日期：2011-10-24
基金项目：国家自然科学基金项目（No. 40872175）；国家重点基础研究发展计划（973 计划）（No. 2011CB710604）。
第一作者简介：胡新丽，女，1968 年生，博士，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: huxli2000@163.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平缓地带，主要是在滑坡前部[1−2]。抗滑桩桩位的确定主要是依据剩余下滑力曲线，将桩位置于推力曲线的下降段，即滑坡阻滑段[3]。在确定具体桩位时，依据经验确定，任意性很强，很难达到经济、安全、适用的多重目的。张显书等[4]提出用“结构设计法”来确定抗滑桩的桩位，即考虑滑坡体的地质条件、推力曲线、结构设计和施工难易程度综合确定桩位。欧阳辉等[5]提出考虑抗滑桩对桩后岩土体的作用力，在滑坡稳定区确定桩位时，设桩位于推力差值最小点即为抗滑桩的合理位置。以上的桩位确定方法，主要基于剩余推力法，综合考虑地质条件和施工条件。雷文杰等[6]用有限元强度折减法对单排桩、桩间距为 4 m 的抗滑桩在不同设桩位置加固滑坡进行数值模拟，研究不同的桩位影响滑坡的稳定安全系数、滑动面位置和形状来确定桩位，未考虑水库运行特征。水库运行条件下滑坡稳定性的研究，研究者主要利用极限平衡理论、考虑水-土耦合的数值模拟研究[7−10]。对于水库运行条件下的水库滑坡合理桩位确定还缺乏系统的研究。因此，有必要对此进行深入探讨，为工程设计提供参考和依据。

本文以张桓候庙园区东侧滑坡为例，考虑应力场和渗流场耦合作用，在分析滑坡地质条件的基础上，依据三峡水库水位波动的实际运行条件，进行不同桩位滑坡变形规律及稳定性变化规律研究。提出合理桩位的确定方法以及抗滑桩稳定性系数修正方法，为水库滑坡抗滑桩设计提供参考。

2 滑坡基本特征

张桓候庙园区东侧滑坡为大型横长式土质滑坡，位于云阳县长江南岸盘石镇龙安村秦家院子，与云阳新县城隔长江相望。滑坡南北长为 420 m，东西宽为 550 m，面积约为 23.1×10^4 m^2，滑体平均厚度为 27 m 左右，滑坡体积为 624×10^4 m^3。老滑坡的滑体覆盖在Ⅰ级阶地之上，前缘高程为 154 m 左右，新滑坡前缘在库岸护坡脚附近，高程为 158～162 m 左右；滑坡后缘高程为 230 m 左右。张桓候庙园区东侧滑坡的新老滑坡边界均较为清晰（见图 1），滑坡属推移式滑坡。

滑体物质主要为含碎块石的粉质黏土，局部为碎块石土。滑床前部为粉质黏土，后部为基岩。滑带物质成分主要为黏性土。基岩滑床为 J^3sn 砂岩、泥岩互层。滑坡原设计抗滑桩位如图 2 所示。

自 2006 年 5 月三峡蓄水以来，滑坡体开始出现变形迹象，最严重的部位主要集中在滑坡的四周边界位置，在滑坡东西两端前缘边界同时出现护坡片石的变形隆起，显示出滑坡变形的整体性。地表变形后部变形最快，前缘次之，中部最缓，仍呈现出推移式滑坡模式。滑坡西段的两个深部位移监测点数据表明，滑体从岩土界面处以上的位移变形量较下部基岩增大，最大位移差达 5.8 mm，滑体内部变形速率基本一致，说明滑坡在整体变形，滑带位于岩土界面处。

滑坡治理设计采用悬臂式抗滑桩，综合考虑滑坡推力曲线下降阶段，保护居民建筑及道路安全，尽可能避免地下水对施工的影响等因素，桩位选择设置于桩位Ⅱ处，地面高程为 175 m，桩截面尺寸为 2.75 m×3.5 m，桩间距为 5.0 m，桩长为 30.5 m，如图 3 所示。

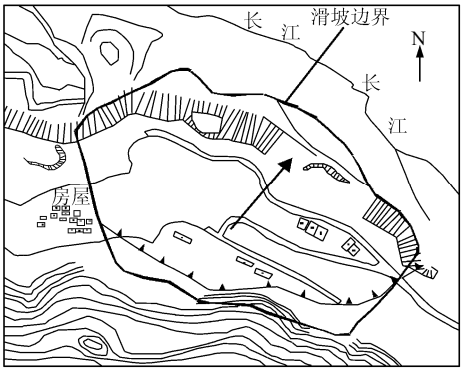


图 1 张桓侯庙滑坡平面图

Fig.1 Zhanghuanhoumiao landslide plan

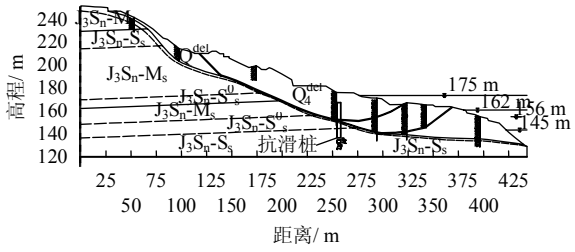


图 2 张桓侯庙滑坡地质剖面图

Fig.2 Geological profile of Zhanghuanhoumiao landslide

3 数值模拟模型和模拟方法

3.1 力学模型建立

选取滑坡主剖面，突出滑坡主要特征，建立张桓侯庙滑坡的力学模型，其左右边界为水平约束，下边界为竖向约束边界，上边界为自由边界。渗流约束边界：左边界为定水头边界，右边界为变化水头边界，下边界为隔水边界。其力学模型如图 3 所示。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

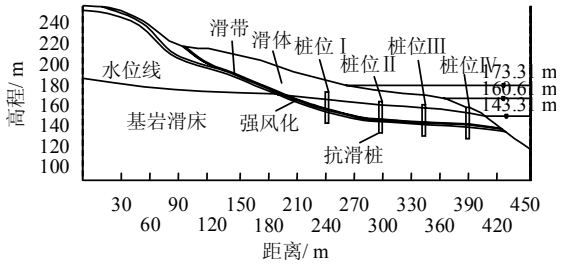


图 3　不同桩位计算模型

Fig.3　Computational model for different pile positions

3.2　模拟方案

工况 1：145 m 稳定水位条件下设桩前后数值分析。

工况 2：不同抗滑桩桩位条件下（4 种桩位），库水位波动对其稳定性影响数值研究；其中桩位 I 为下滑段接近滑坡最大推力区域，桩位Ⅳ为滑坡最前缘，桩位Ⅲ为桩位 II 和桩位Ⅳ的中间过渡位置；4 种桩位分别选取了下滑段、阻滑段，同时考虑了阻滑段不同位置的抗滑桩优劣对比（桩位 II、III为阻滑段后缘，桩位Ⅳ为阻滑段前缘）。

水库运行波动周期为 1 a，各段时间为：①145 m 稳定水位，保持时间为 41 d；②145 m 升至 175 m 水位，历时 29 d；③175 m 稳定水位，保持时间为 62 d；④175 m 降至 145 m，历时 121 d；⑤145 m 稳定水位，保持时间为 92 d；⑥145 m 升至 162 m，历时 10 d；⑦162 m 降至 145 m，历时 10 d。

采用 Geostudio 有限元计算软件，该软件可进行渗流场和应力场的耦合计算。依据模拟方案，选取摩尔-库仑本构模型，进行二维有限元模拟分析。

3.3　计算参数

根据滑坡工程地质勘查资料，确定模拟的岩土体物理力学参数（见表 1）。

4　滑坡体位移分析

4.1　滑坡体应力场特征

图 4 为滑坡 145 m 水位应力等值线云图，可以看出：

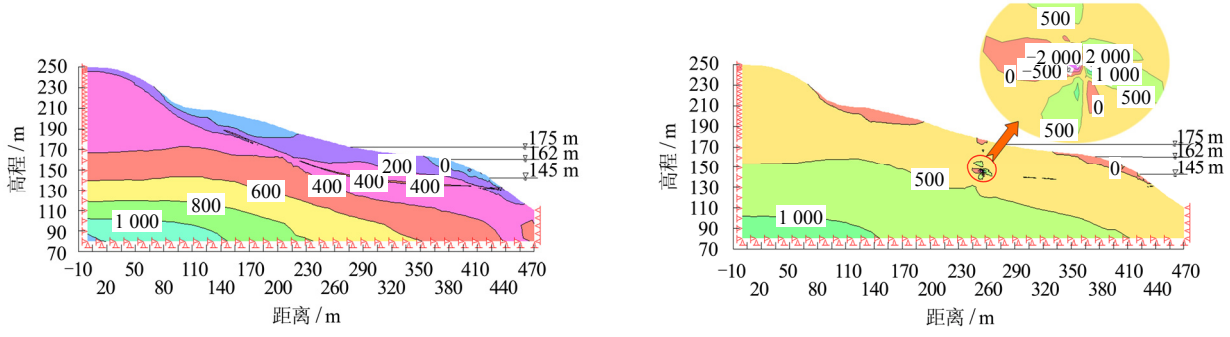
（1）设桩前，滑坡体总应力分布从下至上依次减小，但滑带出现应力集中，局部位置可达 400 kPa，表明滑坡存在滑动趋势。

（2）设桩后，前部滑带位置的应力集中现象大部分消失，只有极少数残留；抗滑桩锚固段前后应力明显增大，出现鲴状分布的应力集中区域，桩前正应力集中，桩后负应力，最大值（绝对值）均超过 2 MPa，说明抗滑桩起到了抗滑作用，滑坡体整体稳定性提高。

表 1　岩土体物理力学参数

Table 1　Physico-mechanical parameters of rock and soil

滑坡结构	岩土体状态	弹性模量 / MPa	泊松比 μ	重度 / (kN/m^3)	黏聚力 / kPa	摩擦角 / (°)	渗透系数 / (m/d)
滑体	天然状态	1 502.6	0.30	23.6	58.5	22.17	7.46
	饱和状态	1 136.8	0.31	23.9	42.9	17.88	
滑带土	天然状态	50.0	0.36	20.5	30.0	13.79	0.24
	饱和状态	33.4	0.37	20.7	21.8	11.86	
强风化层	天然状态	1 5092.0	0.27	24.5	240.0	32.89	6.08
	饱和状态	1 0564.4	0.28	25.1	60.0	22.77	
滑床砂岩	天然状态	4 7971.0	0.23	26.6	6 800.0	46.97	4.16
	饱和状态	4 5276.0	0.24	27.2	1 400.0	38.72	



(a) 设桩前　　(b) 设桩后

图 4　145 m 水位设桩前后滑体 *X* 方向总应力等值线图

Fig. 4　*X*-direction stress contours of landslide before and after piling under reservoir water-level 145 m

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.2 滑带位移分析

滑坡滑带前缘、中部及后部分别取典型节点3216、889、244，工况 2 滑带位移结果见图 5。

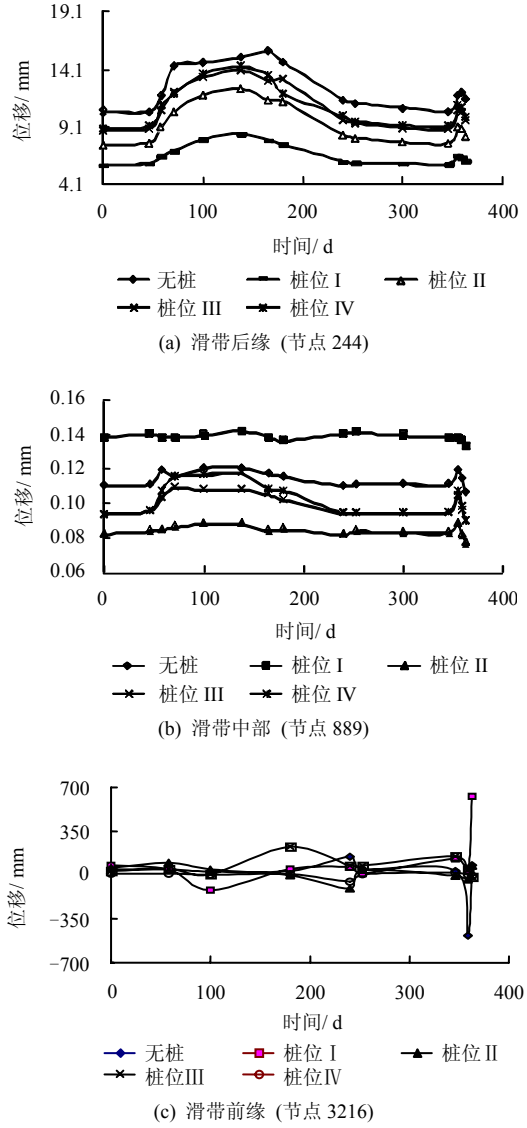


图 5 工况 2 滑带位移变化曲线图

Fig.5 Sliding zone displacement curves with water-level fluctuation in condition 2

由图 5 可以看出：

（1）滑带位移随水库水位波动而变化，水位上升时各桩位滑带前缘位移迅速减小，后缘位移增大；高水位运行时，位移增量基本为 0；水位下降时，滑带后缘位移减小。

（2）滑带前缘位移增大其原因为：①当水位上升时，坡外以及地下水的渗透压力为向下且向坡内方向，从坡脚位置一直向上扩展，滑坡体在受到向下向内的作用力的情况下，其位移会在原有下滑力作用下有所减小，若水位上升较快，渗透压力较大或者有复合滑动面时，甚至可能出现局部的反方向位移，即位移负值；在滑坡的中部，也就是库水渗流和地下水渗流交汇的位置，会出现局部渗流场矢量方向斜向上的情况，且位置逐步向上移动，那么在滑坡后缘位置就会受到向上并向外的渗透压力，所以其原有位移会进一步增大。②滑坡体的变形包括体变和畸变两部分，滑坡体就像一块受到边界约束的橡皮泥，当水位上升时，滑坡体前缘位移减小，在体变不能满足全部减小的位移时，必然会增大其后缘位移来满足位移连续性条件。

（3）未设桩时，滑带位移最大。根据后缘位移情况，比较各桩位，对于滑坡后缘位移最有效的控制桩位是桩位Ⅰ，其后依次是桩位Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。对于滑坡前缘位移最有效的控制桩位是桩位Ⅳ，其后依次是桩位Ⅱ、Ⅰ、Ⅲ，对于滑坡中部位移最有效的控制桩位依次是Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅰ。

（4）滑坡前缘区域，在水位上升或最高水位时刻出现位移最小值 – 121 mm，在水位急速下降时刻出现位移最大值 628 mm；滑坡后缘区域，在水位下降和最低水位时刻出现位移最小值 5.8 mm，在水位上升和最高水位时刻出现位移最大值 15.7 mm。

5 滑坡稳定性分析

稳定性计算选用了多种计算方法，其中包括 FE（Finite Element）法、M-P（Morgenstern-Price）法、Janbu 法、Bishop 法等，各个工况的计算结果见表 2 及图 6。

5.1 工况Ⅰ稳定性结果分析

表 2 为工况 1 在 145 m 稳定水位抗滑桩设置前后稳定性计算结果，可以看出，抗滑桩提高了滑坡整体稳定性；各方法的稳定性评价存在较大差异，因此，应慎重依据相关规范和条件选用合适方法，对于堆积层滑坡应采用 Janbu 法、Bishop 法进行评估。

表 2 工况 1 滑坡稳定性计算结果

Table 2 Landslide stability results in condition 1

方法	145m 静态水位		水位波动	稳定性折减系数
	设桩前	设桩后		
FE	1.010	2.214	2.172	0.981
M-P	1.003	2.505	2.256	0.901
Janbu	0.989	1.518	1.483	0.977
Bishop	1.047	1.663	1.622	0.975

5.2 工况 2 稳定性结果分析

4 种抗滑桩桩位，在滑坡中前部位置，从中部向前缘依次为桩位Ⅰ～Ⅳ，其中桩位Ⅰ为原抗滑桩

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设计位置，除桩位外其他抗滑桩特性均相同，具体位置如图 3 所示。

图 6 为工况 2 滑坡稳定性计算结果，对其进行统计分析，其结果如表 3 所示。

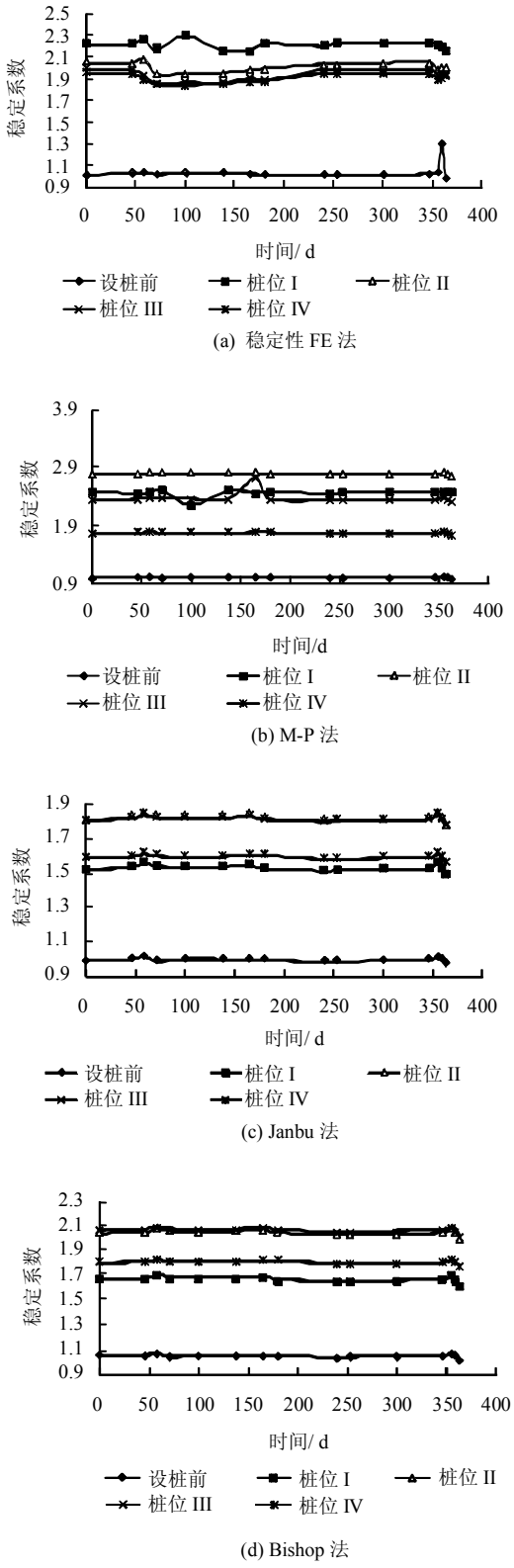


图 6　工况 2 稳定性系数变化曲线

Fig.6　Stability factor curves during water-level fluctuation in condition 2

表 3　工况 2 滑坡稳定性优劣排序表

Table 3　Landslide stability order in condition 2

方法	好	次好	较差	差
FE 法	桩位Ⅰ	桩位Ⅱ	桩位Ⅲ	桩位Ⅳ
M-P 法	桩位Ⅱ	桩位Ⅰ	桩位Ⅲ	桩位Ⅳ
Janbu 法	桩位Ⅲ、Ⅱ		桩位Ⅳ	桩位Ⅰ
Bishop 法	桩位Ⅲ、Ⅱ		桩位Ⅳ	桩位Ⅰ

从表 3 统计结果看，桩位Ⅱ为抗滑桩设置最适宜区域，桩位Ⅳ为桩位最差位置。

6　抗滑桩设计修正讨论

（1）桩位确定

抗滑桩设计中，按照现有规范内容，要求抗滑桩设置桩位为滑坡阻滑段。通过本文的研究认为，在有库水位周期性变化的库岸边坡区，抗滑桩的设置除了应该满足规范要求外，还应考虑库水位对其的影响，在只考虑工程效果时，应该设置在桩位Ⅱ，在实际应用时，应综合工程造价的影响。

（2）抗滑桩设计安全系数修正方法

在周期性库水位作用条件下，滑坡静止水位条件下求得的稳定性系数会一定程度减小，如表 2 所示。

从表中统计数据可知，稳定性系数折减系数 λ 取值区间为[0.901, 0.981]，则设计安全系数应为

$$F_s' = \frac{F_s}{\lambda} \qquad (1)$$

式中：F_s' 为修正后安全系数；F_s 为修正前安全系数取值。

且由上面分析可知，考虑水位波动的影响，应对现有的稳定性计算方法修正，以补充稳定性系数的折减，式（1）为在稳定水位计算稳定性系数的基础上的设计安全系数修正公式。

7　结　论

（1）当库水位上升时，滑坡前缘位移迅速减小，但后缘位移迅速增大。滑坡前缘、后缘出现极值的水位相反，前缘在水位下降和最低水位时刻出现位移最大值；滑坡后缘在水位上升和最高水位时刻出现位移最大值。

（2）滑坡后缘、前缘和中部位移最有效的控制桩位分别是桩位Ⅰ、Ⅱ，对于本文讨论的滑坡，最优桩位是桩位Ⅱ，而较差桩位是桩位Ⅳ。

（3）考虑水位波动的影响，提出对现有抗滑桩设计的设计安全系数修正方法。

（4）滑坡前缘坡脚位置属于局部破坏区域，也

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

是滑坡塌岸区，抗滑桩不能有效控制该部分位移，滑坡治理设计中需单独对该部分护坡进行设计。

参 考 文 献

[1] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

[2] 佴磊, 马丽英, 冷曦晨, 等. 滑坡治理中的抗滑桩设计[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2000, 32(2): 162－165.
NIE Lei, MA Li-ying, LENG Xi-chen, et al. Anti-slide pile design in slope prevention[J]. **Journal of Jilin University(Earth Science Edition)**, 2000, 32(2): 162－165.

[3] 胡新丽, 王亮清, 唐辉明, 等. 三峡库区库岸滑坡抗滑桩设计的几个关键问题[J]. 地质科技情, 2005, 24(增刊 1): 121－125.
HU Xin-li, WANG Liang-qing, TANG Hui-ming, et al. Several key problems for optimum design on anti-slide pile of bank landslide in three gorges reservoir region[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2005, 24(Supp.1): 121－125.

[4] 张显书, 王亮清, 梁烨, 等. 一种确定抗滑桩桩位的方法——结构设计法[J]. 铁道建筑, 2004, (10): 64－65.

[5] 欧阳辉, 吴雪婷. 一种抗滑桩优化设计方法在工程中的应用研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(增刊 1): 115－117.
OUYANG Hui, WU Xue-ting. A case study of application of one optimal design method[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2008, 29(Supp.1): 115－117.

[6] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 950－954.
LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Analysis of pile location on landslide control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 950－954.

[7] BRETH J H. The dynamics of a landslide produced by filling a reservoir[C]//9th International Congress on Large Dams. Istanbul: [s. n.], 1967: 35－45.

[8] MULLER L. The rock slide in the Vajont Valley[J]. **Rock Mechanics and Engineering Geology**, 1964, 2(1): 148－222.

[9] 柴军瑞, 李守义. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1280－1284.
CHAI Jun-rui, LI Shou-yi. Coupling analysis of seepage and stress fields in Xietan Landslide in Three Gorges Region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1280－1284.

[10] 胡新丽, POTTS D M, ZDRAKOVIC L, 等. 三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, 32(3): 403－408.
HU Xin-li, POTTS D M, ZDRAKOVIC L, et al. Jinle landslide stability under water level fluctuation of Three Gorges Reservoir[J]. **Earth Science (Journal of China University of Geosciences)**, 2007, 32(3): 403－408.

全国吹填土地基处理学术研讨会（1号通知）

2012年4月14－15日，武汉

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会　中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会
国家标准《吹填土地基处理技术规范》编制组

承办单位：华中科技大学　河海大学

协办单位：温州大学　中交第二航务工程局有限公司　中交四航工程研究院有限公司
中交天津港航勘察设计研究院有限公司　中交武汉港湾工程设计研究院有限公司
上海港湾软地基处理工程（集团）有限公司　现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司

论文议题：①吹填土工程勘察与基本特性；②吹填土计算理论；③吹填土地基处理新技术；④吹填土地基处理设计与施工；⑤吹填土地基处理检测与效果评估；⑥吹填土其它相关主题顾问委员会。

主　席：郑颖人

委　员：龚晓南　吴中如　张勇传　李广信　殷宗泽　钱力航　张建民　包承纲　周创兵

大会秘书处：联系人：张军 博士　15271818658；余舜 博士　13871140747
电话：027-87557024　论文提交邮箱：dredgerfill2012@163.com
通信地址：湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号 华中科技大学土木工程与力学学院 430074

会议论文征集：

会议论文应围绕主题。会议前将出版非正式论文集。会议期间学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审稿，会后精选一定数量的优秀论文在《土木工程与管理学报》刊出。论文格式请参照《土木工程与管理学报》论文排版格式，论文请按时通过电子邮件发到大会秘书处论文提交邮箱中。

重要日期：①论文全文截止时间：2012 年 2 月 15 日；②论文录用通知时间：2012 年 2 月 31 日；
③论文修改稿截止时间：2012 年 3 月 15 日；④会议时间：2012 年 4 月 14-15 日。

其他事宜：会议期间将举办新技术、新设备、新工艺等展览，欢迎各单位联系和参加。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net