

# 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测 ——以三峡库区泄滩滑坡为例\*

闵弘<sup>1</sup> 谭国焕<sup>2</sup> 戴福初<sup>2</sup> 魏进兵<sup>1</sup> 卢慧<sup>2</sup> 邓建辉<sup>1</sup> 李焯芬<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071) (<sup>2</sup>香港大学土木工程系 香港)

**摘要** 水库岸坡失稳是伴随水电工程建设而产生的一种地质灾害,一般认为主要是由于水库蓄水或运营导致岸坡水动力条件的不利演化造成的。国内外水库岸坡失稳的实例很多,但是岸坡的水动力条件演化过程主要以渗流计算所获得的渗流场作为依据,缺乏系统完整的现场监测资料。以三峡水库蓄水为契机,在湖北秭归县泄滩古滑坡体上建立了一套自动水文监测系统,监测内容包括水库水位、滑坡体水位、渗压与降雨量等。从监测成果来看,岸坡的水位(或渗压)上升速度明显滞后于库水位上升速度,滞后时间与岸坡的渗透性有关,滑带、滑坡影响带和基岩的渗透性相对较弱,滞后时间较长,但是滑坡体的渗透性良好,滞后时间较短;水位观测井的观测成果存在误导,需要结合观测井结构进行分析,建议尽可能使用标准管结构;降雨引起的滑坡体水位上升量和滞后时间与降雨强度关系密切,降雨强度越大水位上升量越大,水位开始上涨的时间越短。因此,对降雨的影响分析有必要考虑雨型,确定合适的基准时间单位。就泄滩滑坡而言,以小时为基本时间单位较为合适。

**关键词** 工程地质, 三峡水库, 蓄水, 古滑坡, 监测系统, 水位, 渗压

**分类号** P 642.22, TV 131.2      **文献标识码** A      **文章编号** 1000-6915(2004)21-3721-06

## HYDRODYNAMIC MONITORING OF A PREEXISTING LANDSLIDE DURING RESERVOIR FILLING—A CASE HISTORY OF XIETAN LANDSLIDE, THE THREE GORGES RESERVOIR

Min Hong<sup>1</sup>, Tham L G<sup>2</sup>, Dai Fuchu<sup>2</sup>, Wei Jinbing<sup>1</sup>, Loo H<sup>2</sup>, Deng Jianhui<sup>1</sup>, Lee C F<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics,

The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

(<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract** Reservoir slope instability is a geological hazard induced by construction of hydroelectric project and is generally believed to be caused mainly by the unfavorable change of hydrodynamic condition in the slope due to reservoir filling and/or operation. Many cases of reservoir slope instability can be found both in China and abroad, the evolution of the hydrodynamic conditions, however, is mainly obtained by seepage analysis, while the systematic and complete field instrumentation data can rarely be found. Taking the opportunity of filling the Three Gorges Reservoir, an automatic hydrologic monitoring system is implemented to monitor the hydrodynamic

2003年12月8日收到初稿,2004年2月19日收到修改稿。

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702)、国家自然科学基金(50279051)面上项目、香港 RGC 项目、国土资源部《三峡库区滑坡塌岸防治专题研究》和中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金(Q110215)资助课题。

作者 闵弘 简介:男,39岁,硕士,1986年毕业于重庆大学采矿系矿山工程物理专业,现任助理研究员,主要从事滑坡方面的研究工作。E-mail: hmin@whrsm.ac.cn.

evolution of a preexisting landslide, Xietan landslide in Zigui County, Hubei Province, China. The system includes the monitoring of reservoir water level, water level in boreholes, seepage pressure and precipitation, etc. The comprehensive analysis of the monitored data shows that the rising speed of water level (or seepage pressure) on the reservoir bank lags behind that of the reservoir filling and the lagging time is closely related to the permeability of materials of the bank. The weaker the permeability of the slip band, sliding-disturbed zone and bed rock are, the longer their lagging time is. If the permeability of the main body is quite good, then only a short lagging time can be observed. Water level data from observation wells are misleading and should be analyzed with the well structure, and standpipe should be used whenever possible. Rainfall-induced water level rising in the main body and its lagging time are greatly influenced by rainfall intensity. Heavy rainfall takes less time to infiltrate into the slope and induces higher water level rising. Therefore, for the analysis of rainfall influence, a basic time unit should be determined according to the rain type. Basic time unit of hour is feasible for Xietan landslide.

**Key words** engineering geology, Three Gorges Reservoir, filling, preexisting landslide, monitoring system, water level, seepage pressure

## 1 引言

水库岸坡失稳是伴随水电工程建设而产生的一种地质灾害。国内外由于水库修建而诱发的岸坡失稳实例并不鲜见,其中,有的造成了巨大的人员伤亡和经济损失,甚至工程报废。例如,巴拿马运河1913年10月10日开始放水,不久E. Cucaracha滑坡开始复活。从1914年8月15日开始通航后,2 a内E. Culebra滑坡(1914年10月14日), W. Culebra滑坡(1915年9月12日)和E. Cucaracha滑坡(1916年8月30日)相继复活,运河被迫三度关闭,时间长达8个月,恢复运河运营的清方量达 $1.530 \times 10^7 \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>。美国Columbia河上的Grand Coulee水库1941年建成蓄水后,在12 a内先后发生滑坡500起,其中约半数(245起)发生在蓄水后2 a内<sup>[1]</sup>。意大利瓦依昂水库建成蓄水后,1963年10月发生了方量约 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的滑坡,造成2 000余人死亡,工程失效<sup>[2]</sup>。国内实例包括湖南柘溪水库塘岩光滑坡<sup>[3]</sup>,湖北的黄龙滩水库滑坡<sup>[4, 5]</sup>等。Riemer统计了60个水库滑坡实例,指出85%的滑坡发生在建设或蓄水期,或工程完工2 a内<sup>[6]</sup>。ICOLD进一步指出75%的滑坡为古滑坡复活<sup>[7]</sup>。

一般认为,水库滑坡主要是由于水库蓄水或运营导致岸坡水动力条件不利而演化造成的,包括库水位的涨落以及暴雨入渗2个方面。文[8]将水库滑坡分为2类:一类是在库区水岩作用影响下产生的滑坡;一类是天然滑坡,无库水直接作用,但有时也可因水库移民开发区的人类工程活动而发生滑动或岸坡大型崩塌。文[9]认为水库滑坡有2种:一种是库水位达到敏感水位后滑体内孔隙水压力分布达

到新的平衡过程中产生的滑坡;一种是发生在库水位消落时,特别是快速消落期。目前,关于滑坡体内孔隙水压力的时空变化及其对滑坡复活的影响研究主要以渗流计算所获得的渗流场作为依据,滑坡体水动力条件演化过程的监测资料极少或不全面。有鉴如此,以三峡水库蓄水为契机,在湖北秭归县泄滩古滑坡体上建立了一套自动水文监测系统,监测内容包括水库水位、滑坡体水位、渗压与降雨量等。作者介绍了监测系统以及滑坡体在水库蓄水过程中的水动力学响应。

## 2 泄滩滑坡简介<sup>[10]</sup>

泄滩滑坡位于湖北省秭归县境内,其下游距三峡工程大坝坝址36 km,上游距巴东县新县城32 km,是泄滩乡原乡政府及乡中学所在地(图1)。

滑坡位于长江左岸,斜坡总体坡向SW20°,平均坡角22°,横向呈凹形,斜坡结构类型为逆向坡。滑坡平面上呈长条形,前缘舌部伸入长江,高程80 m;后缘以陡缓坡交汇处为界,高程380 m。滑坡两侧边界基本以两侧小山脊坡脚为界线。滑坡纵长800 m,前缘横宽440 m,中部240 m,后部180 m,平均宽度260 m;厚度15~42 m,平均30 m;滑坡面积 $20.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;方量 $624 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡中后部主滑方向为SW30°,至中前部转为SW20°(图2)。

滑坡由舌部滑坡堆积物、前缘乡政府平台(1<sup>#</sup>平台)和学校平台(2<sup>#</sup>平台)、滑坡中部汪家湾平台(3<sup>#</sup>平台)、滑坡后缘水池平台(4<sup>#</sup>平台)及滑坡平台之间的较陡斜坡过渡带组成。

滑坡区基岩自新到老为第四系松散堆积层(Q),

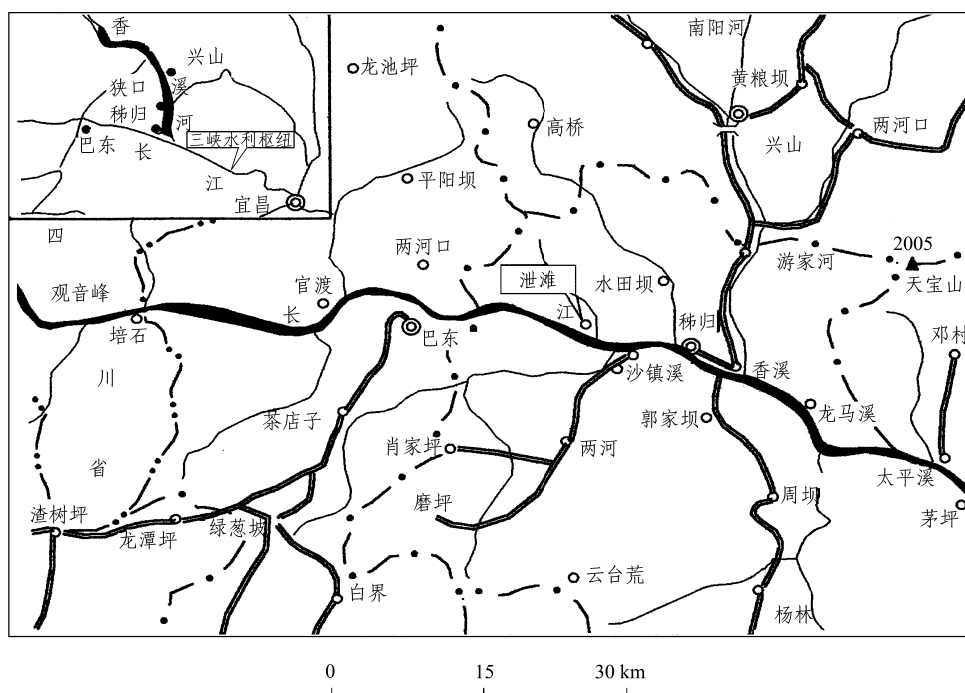


图1 泄滩滑坡位置

Fig.1 Geographical location of Xietan landslide

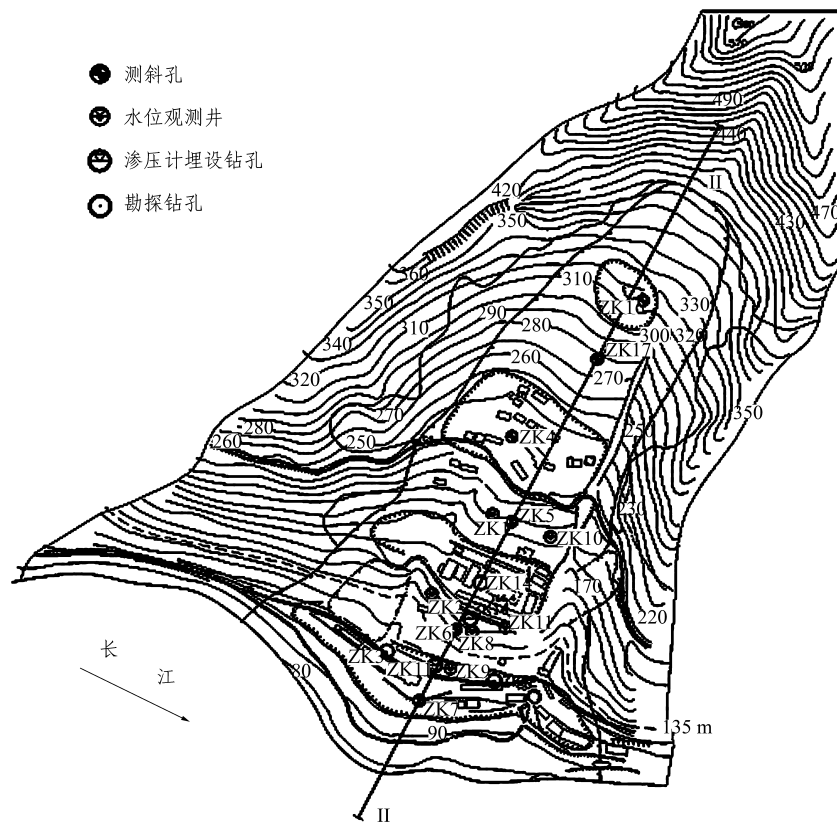


图2 泄滩滑坡平面图

Fig.2 Plan view of Xietan landslide

侏罗系中统聂家山组( $J_2^m$ )，下统桐竹园组( $J_1^l$ )，三叠系上统沙镇溪组( $T_3^s$ )、中统巴东组( $T_2^b$ )。

滑坡堆积体按成分与透水性大致可以划分为 4 层：耕植土层，碎块石土层，滑带和滑坡影响带。表层耕植土层厚度 4~6 m，透水性较差。碎块石土层位于表层耕植土层以下，结构松散，块石成分为粉砂岩、泥质粉砂岩、灰岩、石英砂岩和泥页岩等，块径 5~40 cm。该层透水性强，钻进过程中漏水、垮孔严重。滑带为灰黑色、浅绿色角砾土，土石比 6:4~8:2，角砾呈次棱角状、次圆状，厚 2~3 m。滑坡影响带位于滑带与基岩之间，为结构密实的碎块石土，土石比 6:4~4:6，碎石成分以页岩、粉细砂岩和泥岩为主，具有一定的磨圆度。该层最大厚度达 24.5 m (ZK15)，局部地段缺失。滑带与滑动影响带的透水性很差(图 3)。

### 3 监测系统

三峡水库第 2 期蓄水位高程为 135 m，将淹没滑坡体的前缘部分，因此，监测的重点为滑坡体的前缘，即学校平台及以下部位。监测系统与仪器如表 1 和图 2, 3 所示。

水库水位和 ZK2 钻孔水位为人工观测，其他钻孔水位、渗压以及降雨量数据全部自动采集。渗压与水位自动监测系统由笔记本电脑、自动集线箱、读数仪和渗压计组成，数据自动存储于笔记本电脑。原拟在 ZK13, ZK14 和 ZK15 孔的滑带上下各埋设 1 支渗压计，ZK13 孔的实际安装与设计基本一致；ZK14 孔由于滑带位置判断失误，2 支渗压计均埋设于滑坡影响带内；ZK15 孔的渗压计在安装过程中被套管砸坏。

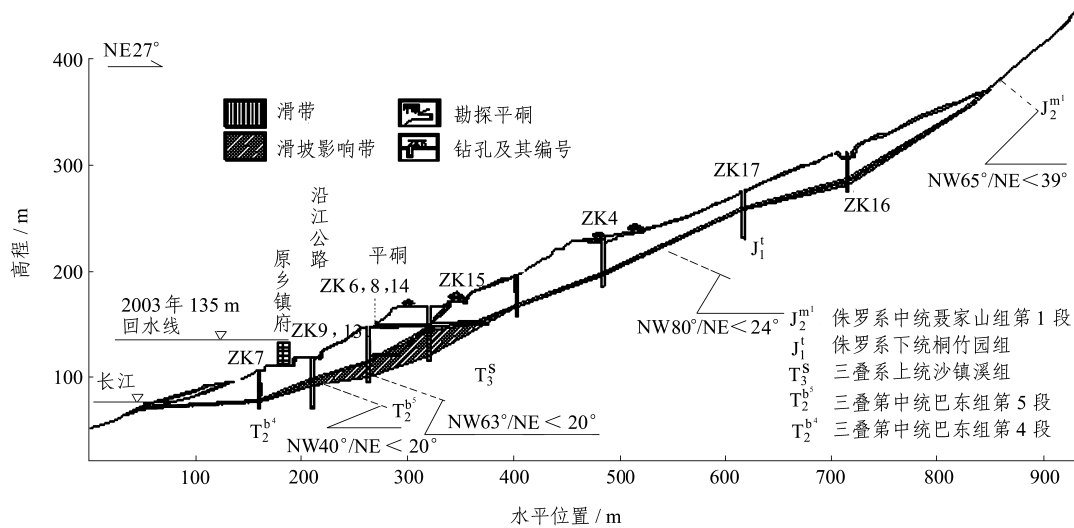


图 3 纵剖面图 II-II

Fig.3 Longitudinal cross section II-II

表 1 泄滩滑坡水文监测仪器一览表

Table 1 Instruments for hydrodynamic monitoring of Xietan landslide

序号	监测内容	监测仪器	仪器数量	安装位置	备注
1	降雨量	RG2-M 自动雨量计	1 台	泄滩中学楼顶平台	
2	钻孔水位	Geokon4500s 型钢弦式渗压计	5 支	ZK1, ZK8, ZK9, ZK10, ZK11	
		SWJ-90 型钢尺水位计	1 台	ZK2	
3	渗压	Geokon4500s 型振弦式渗压计	5 支	ZK13, ZK14, ZK15	ZK15 的渗压计被砸坏
5	水库水位	水位尺	73 m	滑坡体西侧西坡上	
6		VW-403 型读数仪	1 台		渗压与水位自动监测系统的组成部分
7		DGK196 型自动集线箱	1 台		
8		笔记本电脑	1 台		

### 4 滑坡体对水库蓄水的响应

以剖面 II-II 为例分析蓄水过程中滑坡体的水动力学响应。

参看图 2, 3, 钻孔 ZK8 与 ZK14 位置相近, 其中 ZK8 为水位观测井, ZK14 为渗压观测孔。原拟在 ZK14 孔处滑带上下各埋设 1 支渗压计(ZK14-3 和 ZK14-4), 由于滑带高程判断失误, 2 支渗压计均埋设于滑坡影响带内。从图 4 的渗压换算高程与水库水位的对比曲线来看, 滑坡影响带的渗透性很差, 水库蓄水过程中渗压计的压力反应严重滞后。ZK8 孔的花管段埋设于渗透性较弱的滑坡影响带、滑带和渗透性良好的滑坡体碎块石土层内。在水库水位超越滑带顶面高程以前, 钻孔水位表现为缓慢的壅升。这种壅升反映的并不是基岩或滑坡体的真实水位上升现象, 而是流入、流出观测孔水量的一种相对平衡关系。蓄水之前, 通过花管段从滑带顶面流入的水量与通过滑带花管段和钻孔底部流出的水量基本平衡, 钻孔水位稳定在 114.0 m 左右; 水库蓄水打破了上述平衡, 流出量减少导致钻孔水位上升。由于碎块石土层渗透性良好, 水库水位一旦超越滑带顶面高程, 钻孔水位很快就与水库水位一致。

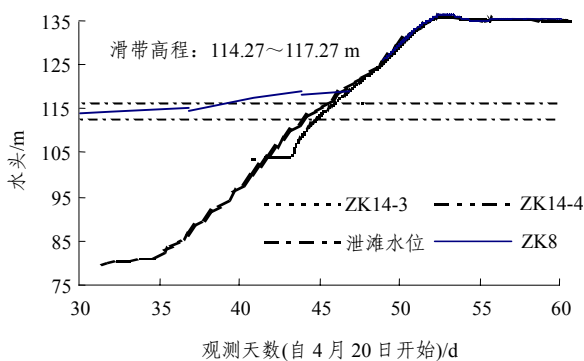


图 4 钻孔水位与水库水位的关系(ZK8 和 ZK14)  
Fig.4 Water level in borehole vs. water level in reservoir (ZK8 and ZK14)

钻孔 ZK9 与 ZK13 位置相近, 其中 ZK9 为混合水位观测孔, ZK13 为渗压观测孔。钻孔 ZK9 的花管段从基岩延伸至碎块石土层, 渗压计 ZK13-1 位于滑坡影响带, ZK13-2 位于滑带内。从图 5 所示的观测成果来看, 基岩、滑坡影响带和滑带的渗透性均较弱, 因此, 钻孔水位上升过程明显滞后于

水库水位上升过程。碎块石土层的渗透性良好, 在水库水位超越滑带顶面高程以后, 钻孔水位与水库水位迅速趋于一致。

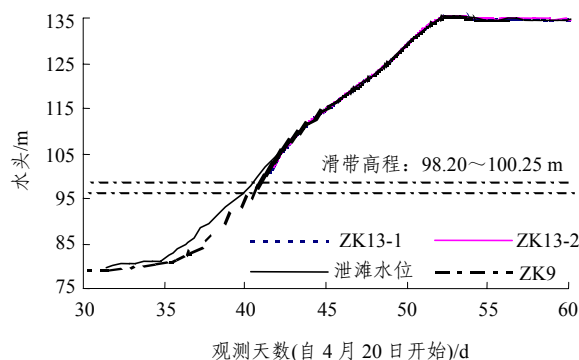


图 5 钻孔水位与水库水位的关系(ZK9 和 ZK13)  
Fig.5 Water level in borehole vs. water level in reservoir (ZK9 and ZK13)

### 5 滑坡体对降雨的响应

钻孔 ZK1 和 ZK10 的孔底高程高于 135 m, 从蓄水期观测成果来看, 钻孔水位不直接受水库蓄水影响。钻孔水位自 6 月 29 日开始使用渗压计进行自动监测。参看图 6 所示的钻孔水位与降雨的关系曲线, ZK10 的水位受降雨控制。下面以 7 月 4 日和 7 月 17 的 2 次降雨分析其入渗过程。



图 6 钻孔水位与降雨的关系  
Fig.6 Water level in borehole vs. rainfall

7 月 4 日降雨量为 64 mm, 主要降雨发生在 7 时 20 分~12 时 44 分(图 7), 在 5.4 h 内共降雨 57.8 mm, 平均每小时降雨量 10.7 mm。钻孔水位自 17 时 18 分开始上升, 20 时 30 分达到相对高位, 在 3.21 h 内上涨 0.426 m, 平均每小时上涨 0.133 m。钻孔水位开始上涨时间滞后于开始降雨时间 9.96 h。7 月 17 日

的主要降雨发生在 2 时 51 分~4 时 42 分(图 8), 在 1.85 h 内累计降雨量 50.2 mm, 平均每小时降雨量 27.1 mm。钻孔水位自 7 时 26 分开始上升, 9 时 38 分达到相对高位, 在 2.11 h 内上升 0.768 m, 平均每小时上升 0.364 m。钻孔水位开始上涨时间仅仅滞后 4.58 h。

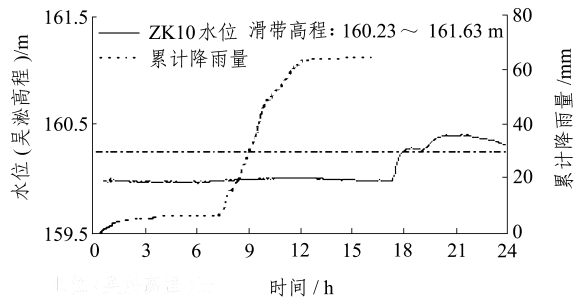


图 7 7 月 4 日的降雨与钻孔水位变化历程

Fig.7 Process of rainfall and water level change in borehole on July 4th

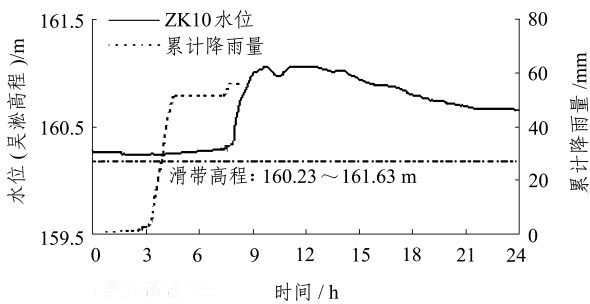


图 8 7 月 17 日的降雨与钻孔水位变化历程

Fig.8 Process of rainfall and water level change in borehole on July 17th

从 2 次降雨入渗过程可看出: 其一, 钻孔水位上升量和上升速度与雨型有关, 降雨强度的影响大于总降雨量的影响; 其二, 由于降雨入渗, 钻孔水位开始上升的时间滞后于降雨时间, 但是滞后时间不是定值。7 月 17 日的滞后时间相对较短, 可能与前期降雨导致滑坡体含水量上升有关, 另外也可能与降雨强度有关。需要补充监测手段和资料进一步确证。

## 6 结 语

为了监测滑坡体在水库蓄水过程中的水动力学响应, 在三峡库区泄滩滑坡上建立了一套相对完善的滑坡水文监测系统, 并且成功地获得了三峡水库蓄水期滑坡体的水动力学响应资料。监测成果对于

揭示水对滑坡的作用机制具有理论意义。

从监测成果来看, 岸坡的水位(或渗压)上升速度明显滞后于库水位上升速度, 滞后时间与岸坡的渗透性有关, 滑带、滑坡影响带和基岩的渗透性相对较弱, 滞后时间较长, 但是滑坡体的渗透性良好, 滞后时间较短; 水位观测井的观测成果存在误导, 需要结合观测井结构进行分析, 建议尽可能使用标准管结构; 降雨引起的滑坡体水位上升量和滞后时间与降雨强度关系密切, 降雨强度越大水位上升量越大, 水位开始上涨的时间越短。因此, 对降雨的影响分析有必要考虑雨型确定合适的基准时间单位。就泄滩滑坡而言, 以小时为基本时间单位较为合适。

监测系统尚需进一步完善, 其一, 监测系统无法自动识别监测通道号, 数据处理工作量太大; 其二, 利用渗压计监测地下水水位的变化存在一定的误差。

## 参 考 文 献

- 1 Lane K S. Stability of reservoir slopes[A]. In: Proc. 8<sup>th</sup> Symp. on Rock Mechanics[C]. [s. l.]: [s. n.], 1967, 321~336
- 2 Hendron A J, Patton F D. The Vaiont slide—a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface[R]. Washington D. C.: US Army Corps of Engineers, 1985
- 3 金德镰, 王耕夫. 柘溪水库塘岩光滑坡[A]. 见: 孙广忠. 中国典型滑坡[C]. 北京: 科学出版社, 1988, 301~307
- 4 李庆普. 黄龙滩水电站的水库滑坡[J]. 水力发电, 1989, (1): 35~39
- 5 钟光照, 吴玉华, 刘世凯. 水库移民安置中的滑坡问题——以黄龙滩水库为例[J]. 人民长江, 1992, 23(10): 31~33
- 6 Riemer W. Landslides and reservoirs(keynote paper)[A]. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides[C]. Christchurch: [s. n.], 1992, 1 373~2 004
- 7 Committee on Reservoir Slope Stability. Reservoir Landslides: Investigation and Management[R]. Paris: International Commission on Large Dams (ICOLD), 2002
- 8 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2): 1~9
- 9 王士天, 王思敬, 刘汉超等. 大型水域水岩作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境, 1997, 8(1): 69~89
- 10 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院. 三峡库区湖北省秭归县泄滩滑坡工程地质勘察报告[R]. 沙市: 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院, 2002