

# 库水位涨落导致边坡体失稳的实验探索研究

刘曰武, 官欣, 张大为, 陈慧新

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:**根据清江茅坪滑坡的地形、地貌以及岩土混合比例,建立了适合室内模拟研究库水水位涨落的实验装置及实验方法,填制了岩土体实验模型.模拟了水位在涨至模拟坡体前缘临空面一半高度和水位漫过前缘临空面达到第一平台高度时,坡体内的水分布情况.在水位降落实验过程中,岩土体部分失稳,证明了润湿滞后在降水期滑坡中起主要作用.

**关键词:**滑坡;实验研究;稳定性分析;水库水位

**中图分类号:**P642.22; O357.3 **文献标识码:**A

## 0 引言

水库水位变化导致库岸边坡失稳是水利工程中遇到的一个重大问题,然而这一问题直到1963年瓦伊昂滑坡事件才引起工程界的足够重视<sup>[1-3]</sup>.

水库库岸滑坡的危害主要包括三个方面,一是大量的岩土体滑入水库,减小了有效库容,甚至形成坝前坝,使水库不能继续使用.二是如果滑坡体高速滑入水库,会形成巨大的涌浪,直接危及大坝安全及电站的运营.三是坡体植被和耕田的损失以及对水利交通的破坏.因此,研究水库库岸滑坡的稳定性,对确保水电工程建设的顺利进行及正常运营意义重大.

诱发库岸边坡失稳的因素较多,如水库水位的升降、地震、人类活动等等.在没有地震发生的情况下,水是诱发库岸边坡失稳的最关键因素.水与库岸边坡岩土体的相互作用可概括如下:水对滑坡体滑面的润滑;水位变化直接影响库岸边坡岩土体中的潜水位变化;水的渗流导致库岸边坡岩土体自重和应力的变化;渗流对土颗粒产生动水力;长期浸水将降低库岸边坡岩土体的抗剪强度;水对库岸边坡岩土体的侵蚀;波浪的冲击等.

关于土石混合的岩土体中的渗流国内外报道较少,因此目前对于其中水的运动规律、水土的作用规律还不能准确地进行定量描述.本文将岩土体在水位涨落条件下的水饱和度变化和润湿滞后等作用作为研究重点进行探讨,利用室内模拟实验研究库水涨落过程中岩土混合体边坡的失稳情况.实验证明,对于一定角度的坡体,在库水上升过程中边坡体是基本稳定的,而在库水水位降落过程中,边坡体由于水的浸湿滞后,则极易失稳.

**基金项目:**中国科学院重点项目“KJ CX2-SW-1”和“973”项目“2002CB412703”资助

**作者简介:**刘曰武,男,1965年生,副研究员. E-mail: lywu@imech. ac. cn

### 1 实验设计及实施

为了进行库水涨落过程中水渗流的实验,专门组建了相应的实验设备.所建成的模拟实验箱体和可调整坡角的岩土体工作台如图1所示.实验箱体长2 m,宽1.5 m,高0.8 m.内部平台长1.6 m,宽1.1 m.箱体内可以盛水,用来模拟水库中水位.里面的平台可以通过滑轮吊起,以模拟滑坡滑面的倾角.最大倾角为30°.所使用的含水率测量仪器为荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 ML2x 型土壤含水率测试仪和 HH2 型土壤含水率显示仪.

有了基本的实验仪器和设备之后,根据清江茅坪滑坡的有关数据和地质地形地貌图,以土石质量比为2:1的比例堆积成模拟岩土实验体,如图1所示.石块粒径基本均匀,为2 cm大小不规则块状体灰岩.土是河床的沉积土,主要成分为粉质黏土,粒径小于0.005 mm的颗粒.该种土的剪切强度较低,黏聚力  $C$  为10.4 kPa,内摩擦角  $\Phi$  为0.57°.根据实际坡体的角度将岩土体工作台调整到15°,至此实验准备工作完成.



图1 实验箱体结构及实验模型图

Fig.1 Model map of experiment



图2 初次水位上升实验照片

Fig.2 Picture of 1<sup>st</sup> water level raise

总体实验设计分为三个部分:初次水位上升,二次水位上升,水位降落.

#### 1.1 初次水位上升实验

水流以  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$  流量注入实验箱体,经过26 min达到前缘临空面的一半高度位置,停止注水进行弛豫.2 h后岩土体体内浸润达稳定,然后按照一定测点分布测量模拟岩土体中的含水率.测得的结果如表1所示.实验岩土体的润湿状况如图2所示.

表1 水位升至模拟茅坪滑坡模型前缘临空面一半时滑坡体内含水率(%)实验数据

Tab.1 Moisture Data of Landslide When Water Level Raise at the Half Height of the Soared Interface

y/mm	x/mm			
	150	350	550	750
300	35.4	36.3	39	39.2
500	32.5	32.4	35.6	32.1
700	19.1	26.1	19.4	20.9
900	16.1	20.1	17.4	18.9

#### 1.2 二次水位上升实验

在初次水位上升实验完毕后,经过2 h弛豫,再进行第二次水位上升.水流依然以  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$  的流量注入箱体,当水位漫过模拟岩土体的前缘临空面的第一平台后停止注入水,时

间为 12 min. 重复第一次水位上升实验步骤原定点测量含水率, 弛豫 2 h 后, 按照一定布点分布测量模拟岩土体中的含水率. 测得结果如表 2 所示. 实验岩土体的润湿状况如图 3.

表 2 水位升至模拟茅坪滑坡模型第一平台时滑坡体内含水率(%) 实验数据

Tab. 2 Moisture Data of Landslide When Water Level Raise at the Height of the First Platform

y/mm	x/mm			
	150	300	550	750
700	42.8	36	42.2	40.3
900	42.9	39.8	42.5	40.1
1100	36.9	31.9	36	34.5
1300	18.9	22.7	17.8	25.4



图 3 水位升至第一平台时实验照片

Fig. 3 Picture of experiment, when water level raise at the height of the first platform



图 4 降水实验坡体产生裂缝失稳后的状态

Fig. 4 Picture of landslide's state after pump water table has drawn down in the experiment

### 1.3 水位降落实验

在进行完第二次水位上升实验后, 弛豫 2 h 进行水位降落实验. 水流以  $100 \text{ cm}^3/\text{s}$  的流量从实验箱体底部排出. 当排水 20 min 时, 水位降至模拟岩土体边坡前缘临空面下缘, 在第一平台中部出现与坡体前缘平行的拉裂缝. 在此后 30 min 内不断发展, 同时仍然有一定的水从模拟岩土体中渗出. 持续 30 min 后, 水的流量变得很小. 模拟岩土体裂缝不再发展, 达到一个相对稳定状态. 可明显看出, 在水位降落过程中, 由于岩土体的润湿使岩土体的水排出存在严重的滞后现象. 实验模拟岩土体失稳后达到新的稳定状态的状况如图 4 示.

## 2 库水浸泡过程含水率动态变化及分析

为了确定含水率随时间的变化, 在库水浸泡模拟的整个实验过程中选取 (600 mm, 600 mm) 点作为监测点, 每隔 10 min 测量一次含水率. 含水率的实验监测数据如表 3 所示.

表3 固定测点的含水率实验监测数据

Tab.3 Moisture data of fixed point

第一	时间/min	0	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146
试验阶段	含水率/%	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.6	17.8	18.9	20.3	25.8	27.3	28.1	28.3	28.3
第二	时间/min	158	168	178	188	198	208	218	228	238	248	258	268	278	
实验阶段	含水率/%	28.3	28.3	29.1	30.2	32.3	34.6	38.5	39.5	40.8	41.1	41.2	41.2	41.2	
第三	时间/min	298	308	318	328	338	348	358	368						
实验阶段	含水率/%	41.2	41.2	41.2	41.2	40.1	39.8	39.2	39.1						

将实验数据进行整理,可以得到如图5所示的测点含水率动态变化历程图。从图中可以看出:  
 (1) 润湿过程是一个比较缓慢的过程,每一次水位变化从含水率开始增加到达到相对稳定平台都需要较长的一段时间。(2) 在每一个含水率上升的过程中都有一个含水上升较快的短时间段。而且第二次的速度要比第一阶段的大。(3) 润湿滞后在本实验中表现十分明显。在模拟水位降落的试验阶段,含水率一直保持不变。只有当在第一平台中部出现与坡体前缘平行的拉裂缝20 min后,才有一个小幅度的降低。这可能是拉裂缝形成后,缝壁边缘产生一定的排水所造成的。接下来含水率的变化又变得非常缓慢。

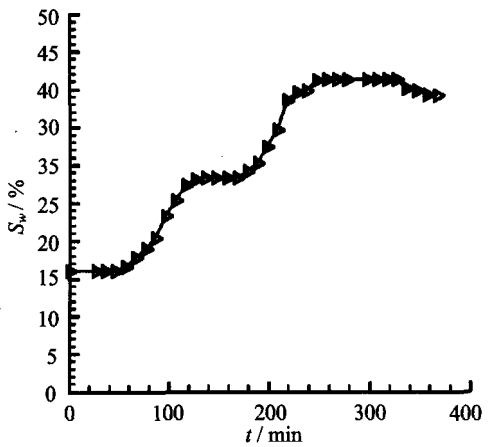


图5 固定测点的含水率动态变化历程图

Fig.5 Moisture changing process at the fixed point in the test model

### 3 实验结果的分析 and 讨论

#### (1) 水位上升过程中水的分布是一个动态的不定常过程

从第一次水位上升和第二次水位上升的实验中都可以观察到岩土体中水的润湿线是一个不断发展的过程,即使水位上升到某一位置停止后,水润湿线在一定时间内仍然继续上升,这是水位上升过程中的润湿滞后效应。在本文中认为模拟岩土体的滞后时间为2.0 h,但是对一个实际的边坡达到稳定的时间会很长。

#### (2) 水位降落是滑坡体失稳的积极推动因素

水位降落过程中,由于水的湿润滞后,岩土体中的水并非立即从岩土体中排出,因此岩土体的容重是增加的。在斜坡条件下,增加的容重在沿斜坡面方向产生一个方向力,推动斜坡向下运动,导致斜坡失稳。另外,黏土遇水后,在黏土的晶格间增溶一定量的水,使黏土膨胀。这样,由于水的作用,使黏土的黏聚力和内摩擦角降低,因此有利于在岩土体内产生软弱面,致使坡体滑动,这就是水位降落导致滑坡失稳的重要原因。

#### (3) 简单毛管压力计算公式不适合模拟水位上升和降落过程

对于本文中实验结果,我们试图用文献[4]和[9]中的毛管压力公式进行模拟,但结果相差较大。关于此问题将在下一步的工作中继续进行研究讨论。

## 4 结 论

根据岩土体中渗流的特点,建立了适合室内实验研究库水水位涨落的实验装置及实验方法.根据清江茅坪滑坡的有关地质资料建立了模拟实验体模型.通过两次水位上升实验,测得模拟岩土体中的水分布,发现润湿滞后现象.水位降落得到了润湿滞后对坡体失稳所起作用的影响,并观察到了坡体失稳过程,证明了润湿滞后在降水期滑坡中起主要作用,这将有助于进一步深入研究水在滑坡中的作用,为滑坡稳定性的判断提供一个新的基础依据.

### 参 考 文 献

- [1] Hoek. 岩石边坡工程[M]. 北京:冶金出版社,1982.
- [2] Quido Zaruba, Vojtech. Landslides and their control [M]. PRAUE, Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Science, 1969.
- [3] Griffiths J S, Stokes M R, Thomas R G. Landslides[J]. Proceedings of the international conference and field trip on Landslides. Bristol, UK, 1999.
- [4] 孙纳正. 地下水流的数学模型与数值方法[M]. 北京:地质出版社,1982.
- [5] 申润植[日]. 滑坡整治理论和工程实践[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.
- [6] 崔政权,李宁. 边坡工程:理论与实践最新发展[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [7] 张有天. 重视岩体渗流研究,确保工程设计安全[J]. 岩石力学与工程学报,1989,(3).
- [8] van Genuchten M T. A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44:892 - 989.
- [9] Reitsma S, Kueper B H. Laboratory measurement of capillary pressure - saturation relationships in a rock fracture [J]. Water Resour Res, 1994, 30 (4) :865 - 878.
- [10] 张有天,刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(2):103 - 111.

## Experimental Study on the Instability of the Landslides During the Reservoir Water Level Changing

LIU Yue - wu, GONG Xin, ZHANG Da - wei, CHEN Hui - xin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** The experimental equipments have been established for studying landslide under the condition of reservoir table changing in the laboratory. The laboratory model is made based on the shape, geometric characters and soil - rock ratio of Maoping slope. The water distributions in the simulated slope are simulated with water table at the half height of the soared interface and the height of the first platform. When the reservoir table drops down in the experiment, part of the slide fails. The results show that wetting lagging is the main factor in slide failure during the reservoir table drops down.

**Key words:** landslides; experiment study; stability analysis; reservoir water table