

# 堰塞湖坝体稳定性研究现状及展望\*

石振明<sup>①②</sup> 李建可<sup>①</sup> 鹿存亮<sup>①</sup> 王友权<sup>①</sup> 许强<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(<sup>②</sup>地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

**摘要** 2008年5月12日汶川发生里氏8.0级大地震,在灾区形成了30多个堰塞湖,严重威胁了下游人民群众的生命财产安全,引起了世人对堰塞湖坝体稳定的高度关注。本文在前人研究的基础上,从地形地貌、诱发原因、寿命三个方面总结了堰塞湖坝体形成及存在的机理。重点分析总结了目前堰塞湖坝体稳定性的研究进展,指出影响坝体稳定性的内因为堰塞湖的形态与规模、物质组成与结构,外因为堰塞湖湖水体积;总结了前人关于影响坝体稳定性的关键因素以及室内模型试验的研究成果。最后分析了目前研究存在的问题,展望了未来的研究方向。

**关键词** 关键词 堰塞湖 坝体稳定性

**中图分类号**:P642.22 **文献标识码**:A

## RESEARCH STATUS AND PROSPECT OF THE STABILITY OF LANDSLIDE DAM

SHI Zhenming<sup>①②</sup> LI Jianke<sup>①</sup> LU Cunliang<sup>①</sup> WANG Youquan<sup>①</sup> XU Qiang<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

(<sup>②</sup>State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** At 14: 28, on 12 May 2008, the earthquake with Richter scale 8.0 occurred at Wenchuan County, Sichuan Province. More than 30 landslide dam lakes had been formed, which made a great threat on people's life and property and drew a great attention from people over the world. On the base of previous investigations, the paper summarizes the mechanism of forming and existence of the landslide dams in terms of topography and geomorphology, induced factors and lifetime. The focus is on the research progress of the stability of landslide dams. It is pointed out that the internal causes of the stability of landslide dams are their morphology and scale, material composition and structure. The external cause is the volume of barrier landslide dam lake. Then the paper summarizes the previous results of key causes of the stability of landslide dams and of indoor model test. Finally, the existing problems and future research direction of landslide dams are pointed out.

**Key words** Barrier lake, Stability, Landslide dams, Earthquake

\* 收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-07-18.

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(编号:40972177)、地质灾害防治国家重点实验室“科技减灾、重建家园”专项科研资助项目(编号:DZ-KJ-0805).

**第一作者简介**: 石振明, 从事地质工程教学和研究工作. Email: shi\_tongji@tongji.edu.cn

# 1 引言

堰塞湖是一种自然界经常发生的自然现象,主要是在一定的地质与地貌条件下,由于地震、强降雨、火山喷发等原因,滑坡体、泥石流、火山喷发物、冰川堆积物等形成的自然横向阻塞河谷形成坝体,造成上游段壅水而形成湖泊<sup>[1,2]</sup>。世界上影响较大的几个堰塞湖有<sup>[3]</sup>:1987年意大利 Val Pola 滑坡堵江堰塞湖;1993年厄瓜多尔 La Josephina 堰塞湖;1999年台湾南投堰塞湖;2005年8月巴基斯坦 Hattian Bala 堰塞湖。2008年5月12日,四川省汶川县发生8.0级大地震,在灾区形成30多个堰塞湖,其中危险系数最高的是唐家山堰塞湖<sup>[4]</sup>,引起世界范围内各国专家的高度关注。

堰塞湖坝体主要是岩土体快速堆积所致,因而其结构较为松垮,组成物质松散,胶结不良<sup>[2]</sup>,基本上处于非固结或者欠固结状态,而且和人工坝体相比,没有心墙防止渗流管涌,没有输干区控制孔隙水压力,也没有溢流设施来稳定堰塞湖水位,坝体可能会由于漫顶溢流、管涌或者渗透而破坏<sup>[1]</sup>,堰塞湖水瞬间下泄,给下游人民群众的生命及财产带来灾难性的破坏。1933年10月9日,四川省叠溪7.5级地震造成的海子堰塞湖坝体溃决,使断流一个多月的岷江突发洪水,冲毁下游两岸农舍田地,造成约2500人丧生<sup>[2]</sup>。因此较为准确分析堰塞湖坝体的稳定性对于提高堰塞湖坝体溃决的应对能力具有重要的理论和现实意义。

## 2 堰塞湖坝体形成机理

### 2.1 地形地貌条件

20世纪70年代中期,美国地质调查局倡议发起了各国地质学家对本国滑坡堵江进行调查研究工作,Costa和Schuster<sup>[1]</sup>在收集各国相关资料的基础上,指出滑坡堆积物形成堰塞湖坝体形成的地形地貌条件:堰塞湖坝体大都分布在高低不平的山区,峡谷陡峭,且有河流经过;该区域地质现象活跃,有丰富的坝体物质来源,如大量破碎的岩石碎屑物等。聂高众等<sup>[2]</sup>对我国自1856年以来所产生的100多个地震形成的堰塞湖进行了分析,认为地震堰塞湖形成需要三个基本条件:1)地震区内有河流经过;2)河道两侧有山体,河床海拔明显低于周边山体;

3)由于地震产生了山体滑坡,且堵塞了河道。匡尚富<sup>[5]</sup>根据现场调查资料及既往研究,又加上了两个条件:(1)达到河床的土体不因河流来水作用而流动变化形成泥石流而被带走;(2)河流水流的挟沙能力、冲刷能力较小,不能将崩塌土体瞬时冲失。由于堰塞湖坝体大多在陡峭的高山峡谷中瞬间形成,此处多为河流上游,流量不大,冲刷能力弱,所以这两个条件基本上满足。

### 2.2 诱发原因

据Costa和Schuster<sup>[1]</sup>对128个堰塞湖形成原因的分析,最主要的两个诱发因素是:降水和地震,占统计样本的90%;火山喷发是排在第三的诱发因素;其他的诱发因素,比如河流的下切作用只占很小的比例。

降水或者地震任一个因素都可能造成大量堰塞湖。如:1889年日本Totsu河流盆地强降雨在上游1100km<sup>2</sup>范围内形成了53个堰塞湖<sup>[6]</sup>;1783意大利卡拉布里亚地震,造成215个堰塞湖<sup>[7]</sup>;1929年,新西兰北部发生里氏7.6级地震引发滑坡堵江并形成至少11个堰塞湖<sup>[8]</sup>;2004年日本新泻县发生里氏6.6级地震,沿芋川干流和支流一共形成了30多个堰塞湖<sup>[9]</sup>;2008年汶川里氏8.0级大地震沿着断裂带周边共形成了30多个堰塞湖<sup>[4]</sup>。

### 2.3 堰塞湖坝体寿命

Costa和Schuster<sup>[1]</sup>指出堰塞湖坝体存在的时间跨度从几分钟到几千年不等,并根据73个已破坏堰塞湖的例子分析了堰塞湖的寿命,41%的堰塞湖只维持了一个礼拜或更少时间即溃决,超过1a的堰塞湖不超过85%。后来学者多是以此为模式,分析更多的堰塞湖,以期得到较为精确的结论,比如:柴贺军等<sup>[10]</sup>在Costa和Schuster统计的73个堰塞湖基础上,加上24个堰塞湖破坏的实例,得出88%的堰塞湖坝体不到1a即溃决。Casagli and Ermini<sup>[11]</sup>也同样得出约80%的堰塞湖坝体在1a之内即溃决的结论。聂高众等<sup>[2]</sup>认为如果简单地用时间来区分堰塞湖的类型,那么在1d或者几天内溃决的是即生即消型堰塞湖;几天到100a溃决的是高危型堰塞湖;溃决时间超过100a者,是稳态型堰塞湖。可以看出这个分类的时间跨度比较大,尤其是高危型堰塞湖的时间跨度更大。事实上,很多堰塞湖坝体是一部分流失破坏<sup>[12]</sup>。Korup等<sup>[13]</sup>指出这种统计并不精确,因为统计的基数比较少,并没有包括所有的

堰塞湖,很多堰塞湖并没有统计到。

前人的研究多是堰塞坝可能存在时间长短的一般规律,对于具体的某个堰塞湖坝体,如何分析其寿命的长短,也即分析其稳定持续的时间,并没有实质性的进展。

### 3 堰塞湖坝体稳定性研究现状

#### 3.1 物质组成及结构特征

堰塞坝的物质组成及结构特征是分析其稳定与否的基础,坝体堆积物颗粒级配的获取对于预测坝体的进一步变化极为重要,坝体堆积物的颗粒大小影响坝体抗侵蚀的能力以及出现缺口后破坏的速度,还影响坝体上下游边坡的稳定性以及抗剪强度<sup>[1, 14]</sup>。尽管确定堰塞湖坝体堆积物的颗粒级配非常重要,目前还没有统一的标准方法,通常的做法是用取一部分来分析或者是粗略的估算。主要的原因是堆积体材料的尺寸变化幅度太大,从直径10~20m的大块岩石,到直径很小的黏土颗粒均有分布。很多情况下,传统的筛分法和移液管法并不能很好地用来分析堰塞湖坝体堆积物的颗粒级配情况<sup>[15]</sup>,因此一种合理且标准的分析方法成为迫切需要解决的问题。

Casagli 等<sup>[15]</sup>使用网格法和筛分法对意大利亚平宁山脉北部的堰塞湖坝体堆积物进行了颗粒级配分析,得到颗粒级配曲线(图1):

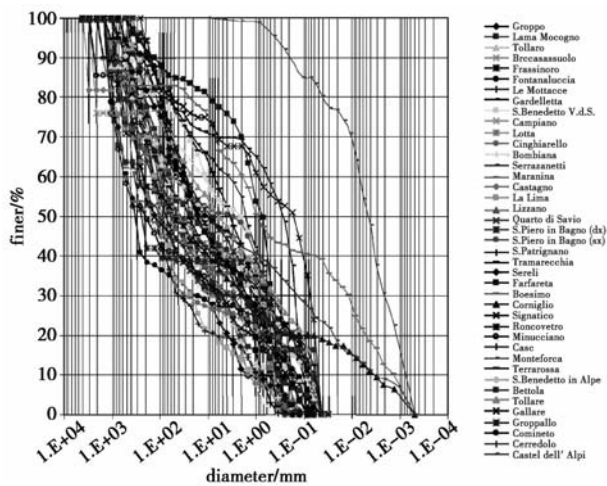


图1 意大利亚平宁山脉北部堰塞湖坝体颗粒级配曲线<sup>[15]</sup>  
Fig. 1 Cumulative grain size distribution of the 42 landslide dams in the Northern Apennines in Italy

从图中可以看出堰塞湖坝体堆积物颗粒分选性

差。从尺寸频数分布(图2)还可以得到堰塞湖坝体堆积物颗粒大小呈双峰式分布的特征。

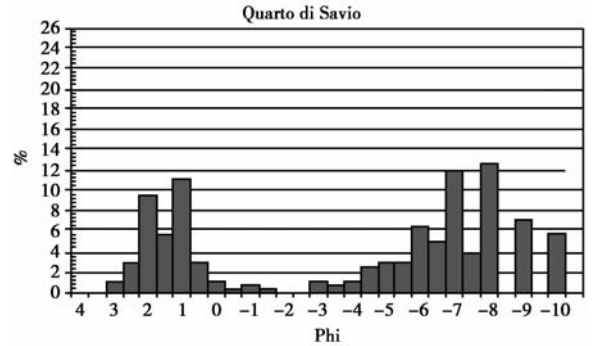


图2 10个所分析的坝体的材料的频率分布图<sup>[15]</sup>  
Fig. 2 Frequency diagram of 10 of the analysed landslide dams

Casagli 等指出两个峰值之间的关系在基于坝体堆积物的组构特征来区分堰塞湖坝体堆积物方面很有用,并按照通行的沉积相分析方法来分析:(1)基质支撑型:在这种类型中,组成坝体的粗颗粒分散于细粒的基质中,彼此间不接触(图3a);(2)颗粒支撑型:在这种类型中,组成坝体的粗颗粒相互接触,细粒基质填充于粗颗粒的缝隙中(图3b)。

国内对于堰塞坝堆积物的研究还没有系统的进行,主要是针对具体的堰塞坝堆积物进行描述。柴贺军等<sup>[16]</sup>为了分析扣山滑坡坝的溃决方式,进行了现场考察并随机选取了代表性式样,进行室内分析,得到了扣山滑坡坝的力学参数及颗粒级配曲线。段启忠等<sup>[17]</sup>在岷江叠溪大海子地震堰塞坝稳定性分析中,对堰塞坝物质组成和结构特征进行了研究,指出地震崩塌体碎石堆积物具有不均匀的结构特征,主要表现在两个方面:一是块石的粒度组成在空间上是不均匀的,二是大块石之间常可见到架空现象。黄河等<sup>[18]</sup>对唐家山堰塞湖坝体进行了物质组成及分布规律的现场考察,根据物质组成的不同,将堰塞坝分为三个区,详细分析了不同区域物质组成的特性,得出了坝体不会整体溃坝的结论。

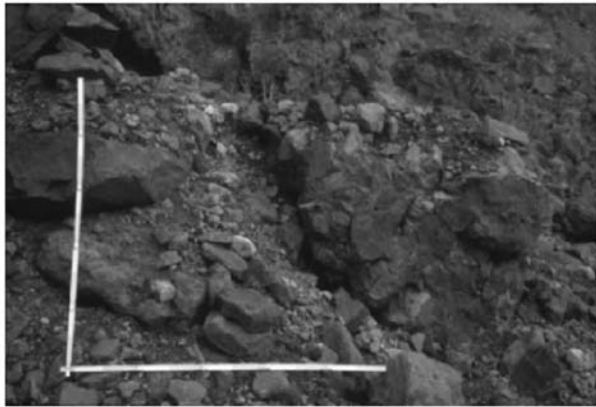
#### 3.2 坝体形态与规模

坝体的形态与规模是影响坝体的稳定性的关键因素之一,也是进行室内模型试验的重点。

以坝体和河床的关系为依据,Costa 和 Schuster 认为堰塞湖坝体可以分为以下六种<sup>[1]</sup>: 1)坝体和山谷宽度相比而言较小,堆积物没有达到河谷的另一边; 2)坝体体积足够大,到达河谷的另一边,甚至有些情况下在河谷另一边形成很高的堆积体; 3)坝体



a



b

图3 坝体材料结构特性分类

Fig. 3 Dam material classification, according to texture

a. 细粒为主; b. 粗粒为主<sup>[15]</sup>

不仅到达河谷的另一边,而且沿着河流的上下游形成一定长度的堆积体;4)坝体是由山谷两侧的崩滑体在河道中相汇而成,可以是头碰头,也可以是相错交汇;5)崩滑体从山谷一侧滑下,形成两个以上的坝体;6)滑坡体的滑动面从河谷的下面经过一直到河谷的另一边而形成的坝体。

通常,可以认为坝体的形态不仅与崩滑体在坡面上运动形态有关,而且受崩滑体体积及河道纵横剖面形状等因素的影响。河道狭窄且岸坡陡峭时,易形成坝体,即使体积很小的崩塌土体就可形成较高的天然坝体,并且,在山地溪流或横断面形状近似于矩形的窄深河道,崩塌土块体积大且能达到对岸时,其形成的天然坝纵断面多为三角形和梯形<sup>[5]</sup>。

Crosta 等<sup>[19]</sup>在详细地形地貌数据的基础上,用数值计算模拟了1987年意大利Val Pola滑坡堵江堰湖坝形成的三维过程,揭示了堰塞湖坝体堆积物形成的过程及几何特征。

前人的研究大多集中在具体堰塞湖的统计分类

上,并没有形成坝体几何形状的计算模型。匡尚富<sup>[5]</sup>在这方面进行了探索,建立了沿河截面为三角形(或者梯形)的滑坡崩滑体模型并且推导出计算公式,且在室内进行了小型模型试验来验证,结果说明了计算公式的合理性。

由于地形地貌的复杂性,建立一个能准确描述堰塞坝形态与规模的计算不仅困难而且不切实际。笔者认为首先要分析出影响堰塞坝稳定的关键因素,进而建立一个描述关键因素的定量计算式才是一个可行的途径。

### 3.3 堰塞湖坝体破坏模式

当堰塞坝承受的外力超过坝体强度时坝体便发生破坏,这些外力包括堰塞湖水压力,渗流的剪切力,漫顶或者其他水动力破坏<sup>[13]</sup>。Korup指出坝体的稳定性还受震区不断发生的余震的影响<sup>[20]</sup>。

Costa和Schuster<sup>[1]</sup>最初根据55个溃决的堰塞湖坝体,分析堰塞湖坝体破坏主要有三种模式:漫顶溢流、潜蚀与管涌、坝坡失稳,其中坝顶溢流是最主要的破坏模式<sup>[1]</sup>。这也得到了后来更多统计资料的认证,据Schuster的研究,在202个堰塞湖坝体破坏的案例中,有197个是因为坝顶溢流破坏,4个是因为管涌破坏,只有1个坝体是因坝坡失稳破坏<sup>[21]</sup>。柴贺军等<sup>[10]</sup>对这三种破坏模式进行了详细分析,并认为可以用河流推移运动理论来分析坝体的漫顶溢流破坏。

尽管堰塞湖坝体破坏的模式已为大家所熟悉,但很少有人能确切知道坝体破坏的过程,因为很少有人能直接观测到坝体破坏的资料<sup>[24]</sup>。

### 3.4 堰塞湖坝体稳定性影响因素研究

Costa和Schuster<sup>[1]</sup>认为堰塞湖坝体存在时间的长短(即稳定与否)主要受以下因素的影响:堆积物的体积、尺寸、形状、以及种类;渗流的速度;集水区物质沉积的速度以及堰塞湖入流量的速度等。Weidinger等<sup>[22]</sup>指出,堰塞湖坝体的稳定取决于坝体的几何特征、内部结构、材料特性以及颗粒级配。后来众多学者提出了分析坝体稳定性的几个主要变量:坝高( $H_d$ )、坝体积( $V_d$ )、堰塞湖体积( $V_l$ )、集水区面积( $A_b$ )。坝体体积越大越不容易破坏,集水区面积则间接反应堰塞湖的入流量;集水区面积越大则坝体越有用破坏的趋势;湖体积越大则坝体承受的水压力越大,坝体破坏的可能性随机上升<sup>[14]</sup>。

Casagli和Ermini<sup>[14]</sup>用坝体体积分别除以集水

面积及湖水体积然后取对数,得到两个参数——堆积指数  $I_b$  (Blockage Index) 和回水指数  $I_i$  (Impoundment Index),如下式所示:

$$I_b = \log\left(\frac{V_d}{A_b}\right)$$

$$I_i = \log\left(\frac{V_d}{V_i}\right)$$

Casagli and Ermini<sup>[14]</sup>利用这两个公式分别对意大利 67 个堰塞湖进行了分析,发现  $I_b$  和  $I_i$  越大堰塞湖越稳定。其中  $I_i$  的规律性较好,统计样本中的堰塞湖稳定则满足  $I_i > 0$ ,坝体不稳定则  $I_i < 0$ 。

Casagli and Ermini<sup>[15]</sup>随后又提出了一个新的指标——无量纲堆积指数 DBI (Dimensionless Blockage Index),如下式所示:

$$DBI = \log\left(\frac{A_b \times H_d}{V_d}\right)$$

这个指标加入了坝高这个变量,因为坝高越高,上下游的水头差越大,坝体承受的压力也就越大,稳定性随之降低,所以坝高是个非常重要的影响因素。Casagli 和 Ermini<sup>[15]</sup>利用这个指标对全球 84 个堰塞湖坝体进行了分析,发现 DBI 越小,坝体越稳定。

但是 Korup<sup>[20]</sup>利用  $I_b$ 、 $I_i$  和 DBI 这三个参数对新西兰的堰塞湖分析时发现其并不能很好的区分坝体稳定与否。表明这种方法的适用还有一定区域性。Korup 认为统计的资料准确性较低可能是结果吻合不好的主要原因,应该选用更多的变量来分析。

童煜翔<sup>[23]</sup>在其硕士论文中,利用 43 例日本堰塞湖的详细资料,使用 SPSS 软件对众多参数进行了分析,建立了包括集水区面积 ( $A_b$ )、坝高 ( $H_d$ )、坝长 ( $L_d$ )、坝宽 ( $W_d$ ) 的数学模型来分析坝体的稳定性。发现影响影响堰塞湖坝体稳定的变量中,集水区面积(尖峰流量)最为重要,其次依序为坝高、坝长、及坝宽。

以上众多学者,从堰塞湖坝体以及堰塞湖的几何特性方面进行了详细的研究。还有众多学者从堰塞湖坝体堆积物的性质方面出发,做了大量的研究。

Costa 和 Schuster<sup>[11]</sup>认为坝体抵抗破坏而保持稳定的最重要特性就是抗侵蚀的能力,不论是抵抗坝体表面溢流时的侵蚀还是管涌或者渗透。Fread<sup>[22]</sup>指出堰塞湖坝体漫顶溢流破坏时坝体的抗侵蚀能力取决于坝体材料的内聚力以及摩擦角。如果坝体是由松散的、密度不高、细颗粒的或者易液化的细粒堆积物构成,那么坝体抗侵蚀能力较弱<sup>[25]</sup>。Schuster<sup>[21]</sup>认为由大块岩石或者有黏聚力的黏土组成坝

体与高渗透性且松散的坝体相比而言,不容易破坏。Crudend 等<sup>[14]</sup>进一步指出漫顶溢流侵蚀坝体会在坝体下游形成跌水甚至形成池塘,但如果坝体是由大块堆积物组成且没有渗流的话,即使是陡峭的堆积体溃坝的可能性也不大。柴贺军等<sup>[10]</sup>运用河流推移理论分析了堰塞湖坝体的稳定性,指出坝体物质组成越粗、越不均匀,颗粒起动被冲刷走所需的水流速度越高。当水流一定是,坝体的粒度组成控制着漫坝洪水对土体的搬运和侵蚀,进而影响坝体的稳定。

从前人的研究可以看出,影响坝体稳定性最重要的因素可以分为内因和外因两大部分,内因为坝体形态与规模、物质组成及结构,外因为堰塞湖湖水体积。据此可以初步判定堰塞湖坝体稳定性,汶川大地震形成了 30 多个堰塞湖,严重威胁着下游人民群众的生命财产安全,在评估溃坝危险等级时主要采用的三个因素为<sup>[4]</sup>: 1) 坝高; 2) 最大库容; 3) 坝体物质组成及结构。这正是前人总结出来影响堰塞湖坝体稳定性最重要的因素。

### 3.5 堰塞湖坝体渗流稳定性研究

堰塞湖坝体稳定研究的另外一个重要方面就是坝体的渗透稳定性。Bromhead 等<sup>[27]</sup>认为坝体的渗透性决定了坝体的长期稳定性。

目前国内主要的研究成果有:王子忠等<sup>[28]</sup>对位于重庆市黔江县小南海堰塞水库研究坝体作了简易试坑渗水试验、钻孔注水试验及抽水试验,对坝体渗漏及渗透稳定进行评价,并提出防渗处理措施。崔银祥等<sup>[29]</sup>对黄河上游某滑坡坝的渗透稳定性进行了研究,通过试验资料确定了坝体与湖底纹泥渗透稳定的可能破坏形式、临界水力坡降和允许水力坡降,在此基础上应用数值模拟方法 (Modflow 程序) 对滑坡坝在正常湖水位与极限湖水位两种工况进行了渗透稳定性评价。

### 3.6 室内模型试验

虽然有众多学者研究堰塞湖坝体稳定性以及破坏模式,但是很少有人确切地知道堰塞湖坝体破坏的过程。因此, Korup<sup>[13]</sup>认为堰塞湖研究的一个重要方向就是用物理模型来模拟坝体的形成、破坏、洪水的运动以及堰塞湖内沉积物的突然下泄,从而得出堰塞湖的稳定性。

目前,已有部分学者开始堰塞湖的室内模型试验。Davies 等<sup>[30]</sup>以 1999 年 10 月发生在新西兰的

Poerua 堰塞湖为模拟对象,在室内以 1:130 的几何相似系数建立了模型,并且模拟了 V 形状山谷。模型高 0.65m,入流量控制在 3l/s,坝体材料由角砾碎石和细砂组成,无内聚力(实际坝体材料内聚力约为 20kPa,按照相似比,坝体材料内聚力应为 0.15kPa),由于研究的重点在于溃坝后最大洪峰发展规律,且认为坝体材料的内聚力对结果没影响,故未加以考虑。模型试验结果很好的模拟了最大洪峰流量,并且得出结论无内聚力坝体的抗侵蚀性取决于水动力而不是坝体材料的性质。

Wishart<sup>[30]</sup>也做了室内模型试验来研究岩崩堆积坝漫顶溢流破坏情况。模型长 1.46m,高 0.25m,宽 0.5m,上游坡脚 15°,下游坡脚 25°,沿河剖面为三角形。坝体为二层结构,表面为粗颗粒碎石,内部为细砂。模型很好的模拟了坝体在水位漫顶溢流后坝体的破坏过程和洪峰的流量变化过程,结果表明岩崩堆积体破坏时裂口的长度和深度并不是线性变化的。

由于堰塞湖坝体的复杂性,以及关于坝体的基础研究(如坝体材料的物质组成及结构特征、坝体的几何形态等)还不充分,使得进行室内模型试验进展缓慢;但从另一方面来讲,进行室内模型试验可以目的明确的去研究某一个因素的作用,使研究逐步深入。

## 4 结论与展望

综上所述,目前众多学者对于堰塞湖坝体稳定性的研究主要分为两类,一类是根据已有的堰塞湖统计资料总结归纳坝体稳定的一般规律,这类研究基本上延续了 Costa 和 Schuster<sup>[1]</sup>所涉及的范围,包括坝体的形成原因、地形地貌分布、物质组成及结构、稳定性因素、寿命等,以期得到堰塞湖坝体的一般规律;另一类研究主要是针对某一个具体的堰塞湖坝体,进行全面的分析,以期得到深入的认识。两种类型互为补充,具体的研究为一般规律的总结提供了详细的素材,而一般性的研究更好地指导了如何具体的分析某一个堰塞湖。具体分析,可以得到以下主要结论:

(1) 堰塞湖是一种普遍的地质现象,其坝体的稳定性研究是最重要的研究方向之一;

(2) 目前对堰塞湖坝体的研究主要集中在地形地貌的分布、稳定性因素的分析、破坏模式及寿命等;还没有系统地研究坝体材料的物质组成及结构

特征;

(3) 影响堰塞湖坝体稳定的几个重要因素为:坝高、库容、坝体的物质组成及结构特征;

(4) 漫顶溢流是最主要的破坏模式,也是坝体失稳的主要诱因;

(5) 坝体渗透稳定性也是研究坝体稳定性重要的一个方面;

在对堰塞湖的未来的研究方面,笔者认为堰塞湖室内模型试验能具体分析堰塞湖的破坏模式和稳定性的影响因素,是一种较好的研究方法。现场试验也是一种有效的研究方法。另外,数值分析方法能快速、高效地分析各种因素对堰塞湖坝体稳定性的影响,因此应注重其在堰塞湖稳定性分析中的应用,以期加强对堰塞湖坝体稳定性规律性的认识。

## 参 考 文 献

- [1] Costa, J. E., Schuster, R. L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, **100**: 1054 ~ 1068.
- [2] 聂高众, 高建国, 邓砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究 [J]. 第四纪研究, 2004, **24**(3): 293 ~ 301.  
Nie Gaozhong, Gao Jianguo, Deng Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake. Quaternary Sciences, 2004, **24**(3): 293 ~ 301.
- [3] Costa, J. E., Schuster, R. L. Documented historical landslide dams from around the world. Open-file report (United States Geological Survey), 1991, 91 ~ 239.
- [4] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2008, **16**(4): 433 ~ 444.  
Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(4): 433 ~ 444.
- [5] 匡尚富. 斜面崩塌引起的天然坝形成机理和形状预测 [J]. 泥沙研究. 1994, **4**: 50 ~ 58.  
Kuang Shangfu. Formation mechanism and shape prediction of natural dam due to slope failure. Journal of Sediment Research, 1994, **4**: 50 ~ 58.
- [6] Swanson, F. J., Oyagi, N. and Tominaga, M. Landslide dam in Japan. American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 1986, **3**: 131 ~ 145.
- [7] Cotecchia, V. Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements [J]. International Association of Engineering Geology Bulletin. 1978, **17**: 5 ~ 37.
- [8] Adams, J. Earthquake-dammed lakes in New Zealand [J]. Geology, 1981, **9**: 215 ~ 219.
- [9] 徐方军, 韩丽宇. 部分国家和地区地震诱发堰塞湖及其抢险概况. 水力发展研究. 2008, **6**: 7 ~ 9.  
Xu Fangjun, Han Liyu. Earthquake-induced barrier lake and Res-

- cue Overview in Some countries and Regions. *Water Resources Development Research*, 2008, **6**: 7 ~ 9.
- [10] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元等. 天然土石坝稳定性初步研究 [J]. *地质科技情报*, 2001, **20**(1): 77 ~ 81.  
Chai Hejun, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan, et al. Preliminary stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide. *Geological Science and Technology Information*, 2001, **20**(1): 77 ~ 81.
- [11] Ermini, L., Casagli, N. Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, **28**: 31 ~ 47.
- [12] Korup, O., Strom, A. L. and Weidinger, J. T. Fluvial response to large rock-slope failures—examples from the Himalayas, the Tien Shan, and the Southern Alps in New Zealand [J]. *Geomorphology*, 2006, **78**: 3 ~ 21.
- [13] Korup, O., Tweed, F. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain [J]. *Quaternary Science Review*, 2007, **26**: 3406 ~ 3422.
- [14] Casagli, N., Ermini, L. Geomorphologic analysis of landslide dams in the Northern Apennine [J]. *Japanese Geomorphological Union*, 1999, **20**(3): 219 ~ 249.
- [15] Casagli, N., Ermini, L. and Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennine: sampling and processing methods [J]. *Engineering Geology*, 2003, **69**: 83 ~ 97.
- [16] 柴贺军, 董云, 李绍轩, 等. 大型天然土石坝的溃决方式及环境效应分析 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2005, **16**(2): 172 ~ 176.  
Chai Hejun, Dong Yun, Li Shaoxuan, et al. Analysis of natural rock field dam break mode and environmental affections. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2005, **16**(2): 172 ~ 176.
- [17] 段启忠, 姜明月. 岷江叠溪大海子地震堰塞坝稳定性分析 [J]. *四川水力发电*, 2004, **23**(1): 93 ~ 96.  
Duan Qizhong, Jiang Mingyue. Stability analysis of the landslide dam in Dashaizi earthquake, Minjiang-dixi area. *Sichuan Water Power*, 2004, **23**(1): 93 ~ 96.
- [18] 黄河, 郑家祥, 施裕兵, 等. 唐家山堰塞湖形成机制及应急处理工程措施研究 [J]. *中国水利*, 2008, **16**: 12 ~ 16.  
Huang He, Zhang Jiaxiang, Shi Yubing, et al. Research on the formation mechanism and emergency handling engineering measures of the Tangjiashan barrier lake. *China Water Resources*, 2008, **16**: 12 ~ 16.
- [19] Costa, G. B., Chen, H., Lee, C. F. Reply of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps [J]. *Geomorphology*, 2004, **60**: 127 ~ 146.
- [20] Korup, O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams [J]. *Engineering Geology* 2004, **73**: 13 ~ 35.
- [21] Schuster R L. Landslide dams—a worldwide phenomenon [J]. *Journal of the Japanese Landslide Society*. 1995, 31 ( 4 ) 38 ~ 49.
- [22] Fread, D. L. BREACH—An erosion model for earthen dam failures [J]. Silver Spring, Maryland, National Weather Service, 1985, 29.
- [23] 童煜翔. 山崩引致之堰塞湖天然坝体稳定性之量化分析 [D]. 台湾中央大学应用地质研究所, 硕士论文, 2008.  
Tong Yuxiang. Quantitative Analysis for Stability of Landslide Dam. National Central University Graduate Institute of Applied Geology [D], 2008
- [24] Walder, J. S., O'Connor, J. E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*, 1997, **33**: 2237 ~ 2248.
- [25] Korup, O. Recent research on landslide dams—a literature review with special attention to New Zealand. *Progress in Physical Geography* [J]. 2006, **26**(2): 206 ~ 235.
- [26] Cruden, D. M., Keegan, T. R and Thomson, S. The landslide dam on the Saddle River near Rycroft, Alberta [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, **30**: 1003 ~ 1015.
- [27] Bromhead, E. N., Coppola, L. and Rendell, H. M. Field reconnaissance of valley blocking landslide remnants: the Cordevole and Piave catchments [J]. *Journal of the Geological Society of China*, 1996, **39**: 373 ~ 389.
- [28] 王子忠, 杨绍平. 小南海水库地震堰塞坝渗漏特征研究 [J]. *四川地质学报*, 2003, **23**(1): 26 ~ 30.  
Wang Zizhong, Yang Shaoping. On Characteristics of Seepage from the Earthquake-induced Barrier Bar of the Xiaonanhai reservoir. *Acta Geologica Sichuan*, 2003, **23**(1): 26 ~ 30.
- [29] 崔银祥, 聂德新, 刘惠军. 黄河上游某滑坡坝渗透稳定性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, **16**(1): 29 ~ 32.  
Cui Yinxiang, Nie Dexin, Liu Huijun. Seepage stability assessment of a landslide dam located in the upper-reach of Yellow River. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, **16**(1): 29 ~ 32.
- [30] Davies, T. R., Manville, V., Kunz, M., Donadini, L. Modeling landslide dam break flood magnitudes: case study [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **7**: 713 ~ 720.
- [31] Wishart, J. S. Overtopping breaching of rock balance dam. A thesis of Master of Engineering in University of Canterbury, 2007.