

# 水库岸坡地质灾害研究现状与趋势\*

陈洪凯, 周晓涵, 唐红梅, 周云涛

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:** 水库岸坡地质灾害防灾减灾是库区生态环境尤其是地质环境保护的重要科学问题,通过对国内外研究文献的查阅分析并结合多年在三峡库区的研究实践,将水库岸坡地质灾害研究现状概括为水库岸坡稳定性变化、破坏机制、库岸再造预测方法等3方面,系统梳理了每个方面的研究情况。结果发现国内外学者高度重视库水位降落对岸坡稳定性与变形破坏特性的影响机制研究,基于卡秋金法提出了多个库岸再造预测新方法,但在库水位多旋回变动对岸坡作用、库水位周期性浸泡劣化岩土物理力学特性、类土质岸坡等方面研究不多。指出了水库岸坡地质灾害进一步研究应予以高度重视的3个方向,即水库岸坡地质环境效应、类土质岸坡变形与破坏和库岸地质灾害治理新技术新方法。

**关键词:** 地质灾害; 水库岸坡; 研究现状; 研究趋势

**中图分类号:** P642.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2016)03-0038-07

近几十年来,为了大力开发水电资源并兼顾防洪需求与区域性水资源调配,各地兴建了大量大型及特大型水库。据不完全统计,80%~90%的水库滑坡与库水活动有关。1963年,意大利北部 Vajont 水库从正常水位下降后,  $2.75 \times 10^8 \text{ m}^3$  的顺层岩体冲入水库,激起的涌浪翻越大坝,造成大坝下游 2 600 余人遇难,是目前世界上最大的水库失事事件。1959年,湖南柘溪水库在蓄水初期于大坝上游右岸 1.5 km 处发生大规模滑坡;广西龟石水库蓄水水位在高出原河床水位 20 m 后,于库首 6.5 km 长的峡谷地带的库岸发生 60 余处坍塌;蓄水后湖南凤滩水库上游 8 km 处堆积体也突然出现失稳破坏,体积达  $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2003年,三峡水库投入运行后,已经诱发了千将坪、凉水井等特大型滑坡的复活,在水库运行期间必将造成沿江两岸 145~175 m 范围大部分岸坡稳定性的劣化甚至出现突发性破坏。大型特大型水库岸坡的变形与破坏这一科学问题一直备受岩土工程、水利工程、地质工程等领域科学家高度关注。伍法权于 2001 年明确指出,21 世纪若干重大工程地质与环境问题中就包括了长江三峡库区水库塌岸问题<sup>[1]</sup>。水库岸坡地质灾害减灾问题是库区生态环境尤其是地质环境保护的重要环节。本文基于对国内外相关文献的检索分析,从水库岸坡稳定性变化、破坏机制、库岸再造预测方法等 3 方面进行研究现状分析,据此提出了该领域亟待进一步研究解决的几个主要问题,并认为相关研究成果对于推动库岸地质灾害减灾理论与减灾技术研究、合理规划利用岸坡土地资源有着积极意义。

## 1 水库岸坡地质灾害研究现状

### 1.1 水库岸坡稳定性变化

库岸边坡尤其是土质岸坡的稳定性对库水位升降变化的响应过程十分敏感,这也是库岸边坡目前研究最活跃的领域之一。陈洪凯等人<sup>[2]</sup>从库水周期性浸泡条件下土体强度减弱和库水位降落产生渗透力两方面,分析了三峡水库运行期间加速库岸滑坡变形与破坏过程问题。董金玉等人<sup>[3]</sup>利用 FLAC3D 模拟方法分析了水库蓄水和下降过程中岸坡的变形破坏特征,发现岸坡前缘变形量最大,中间过渡区变形量最小,后缘属于牵引变形区,变形量介于前缘和中间之间。杨金等人<sup>[4]</sup>利用 Geo-Studio 软件的 SEEP/W 模块,模拟了库水位涨落情况下滑坡体内的暂态渗流场,认为库水位涨落对滑坡前缘浸润线影响区在滑坡前缘 300 m 范围内。吴琼等人<sup>[5]</sup>以稳定渗流情况下的浸润线为非稳定渗流的初始值,由此推导了库水位升降联合降雨作用下均质岸坡浸润线的近似解

\* 收稿日期:2015-02-02 修回日期:2015-12-10 网络出版时间:2016-04-30 9:42

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521; No. 41071017);重庆市自然科学基金重点项目(No. 2013JJB0005);重庆市“两江学者”计划专项经费资助;2013年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. KJTD201305)

作者简介:陈洪凯,男,教授,博士,研究方向为动力地貌学、地质安全理论与工程结构健康, E-mail:chk99@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20160430.0942.014.html>

析解,并利用 GeoSlope 软件中的 SEEP/W 程序对该近似解析解进行验证了分析。林志红等人<sup>[6]</sup>提出关于均质土坡的库水位升降和降雨联合作用时岸坡中浸润线的计算公式,并分析了浸润线的动态变化特性以及压力传导系数、库水位升降速度和降雨强度对浸润线的影响。周丽等人<sup>[7]</sup>采用包辛涅斯克(Boussinesq)非稳定渗流微分方程,分析了巴东县李家湾滑坡的地下水浸润线位置,由此发现库水降速越快、降雨历时越长,滑坡稳定系数越低。通过物理模拟试验,许强等人<sup>[8]</sup>发现塌岸在初始阶段表层迅速被冲刷,然后浅层出现磨蚀,进而深层缓慢地被掏蚀与发生坍塌,直到最后波浪无法作用于水上坡体而趋于稳定。肖诗荣等人<sup>[9]</sup>就千将坪滑坡进行模型试验,结果发现蓄水前的强降雨对滑坡稳定性影响微弱或基本无影响,水库蓄水引起的浮托力作用仅使滑坡产生蠕滑变形,滑带被水浸泡弱化强度降低才是滑坡真正的致滑原因。徐文杰等人<sup>[10]</sup>研究了蓄水及库水位骤降过程中的流-固耦合及相应的稳定性变化特征,认为蓄水初期边坡的稳定性有所下降,当上升至某一临界水位后边坡稳定系数达到最低值,而后随着库水位的上升有所回弹,库水位骤降其稳定系数下降随着骤降幅度的增大而增大。江泊涓等人<sup>[11]</sup>对三峡库区黄土坡临江滑坡体土体进行实验研究,结果发现水岩(土)相互作用加剧了滑坡体中黏土矿物的迁移、富集,影响滑坡稳定性。汪发武等人<sup>[12]</sup>发现三峡水库蓄水初期树坪滑坡滑坡体下部的变形速率较上部快。Zheng 等人<sup>[13]</sup>分析了 2010 年 7 月发生在云南省金沙江右岸,向家坝库区的滑坡,该滑坡在 2010 年 5 月,水库第一次蓄水后已经有明显复活迹象,7 月的突降大雨、周围开挖震动及过度种植导致该滑坡复活,对该滑坡的诱发因素及稳定性进行了分析。Lollino 等人<sup>[14]</sup>对意大利南部 Volturino 滑坡的复活机制进行了研究,通过土压力计及倾斜计对滑坡变形进行监测,并通过使滑体内部孔隙水压力分布与现场数据一致使模型分析滑坡变化过程,然后采用有限元软件对复活过程进行模拟,最后发现该大型深层老滑坡已处于极度不稳定状态。Deng 等人<sup>[15]</sup>认为水库水位变动是诱发库区老滑坡失稳复活的主要原因,他们在对三峡水库岸坡心滩滑坡的研究中发现:在水库蓄水期间,滑坡体内地下水位明显滞后于库水位上升速度,滑坡内的反向渗透作用对滑坡稳定性的影响是瞬时的,而库水位的上升在诱发该老滑坡失稳的过程中起关键作用。Lai 等人<sup>[16]</sup>通过试验的方法利用非饱和模型 Singh-Mitchell 蠕变模型合理模拟了水库岸坡蠕变行为的影响。蒋秀玲和张常亮<sup>[17]</sup>对三峡水库马家沟滑坡的研究表明,滑坡稳定性随着库水位上升而降低,当水位上升到 165 m 时稳定性最小,而水位再上升则稳定性增大。梁学战等人<sup>[18]</sup>基于土质岸坡模型试验分析了土质岸坡在一个蓄水降水循环周期内裂缝体系的时空演化分期配套规律。王小东等人<sup>[19]</sup>基于高分辨率 DEM 数据,采用 GIS 组件开发了非均质成层土水库岸坡稳定性分析方法。卢书强等人<sup>[20]</sup>认为库水位下降和大气降雨激励了树坪滑坡的变形;宋琨等人<sup>[21]</sup>深入探讨了不同渗透性滑坡在库水位变动条件下的稳定性响应规律,结果表明库水影响系数  $\alpha$  在  $-0.107 \sim -0.322$  时,稳定性变化率  $\beta$  最大。Midgley 等人<sup>[22]</sup>通过常水头原位试验分析了岸坡在渗流驱动下的侵蚀问题和稳定性衰减问题,发现渗流速度为  $0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  时岸坡土体的侵蚀速度可达  $0.86 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Kukemilks 和 Saks<sup>[23]</sup>分析了日本 Gauja 河谷岸坡侵蚀问题,采用 GIS 空间分析法建立了岸坡敏感性指数模型。

综上所述,现有研究主要着眼于土质岸坡,并强调土体的渗透性及库水位变化造成的渗透作用对岸坡稳定性的不良作用,而对于类土质岸坡及土体物理力学参数在库水位周期性浸泡条件下的劣化特性关注不多,未考虑库水位多旋回变动对岸坡稳定性的影响。

## 1.2 水库岸坡破坏机制

水库岸坡破坏问题是水库岸坡地质环境效应的重要科学内容,是进行岸坡工程治理必须首先关注的科学问题,迄今取得了较多科研成果。Nian 等人<sup>[24]</sup>对三峡库区老滑坡破坏机制研究表明,不饱和滑带土呈现出应力应变软化现象,而饱和土表现出应力应变硬化特征。张桂荣等人<sup>[25]</sup>对降雨入渗及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性进行分析,发现水库蓄水及临界雨量为  $100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、水库降水及临界雨量为  $200 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  时,滑坡就可能失稳。廖秋林等人<sup>[26]</sup>认为滑坡复活的主要成因是脆弱的地质结构和集中降雨,且库水位上升在其中起到了加速作用。Bosa 和 Petti<sup>[27]</sup>针对瓦伊昂滑坡产生的涌浪建立了水平双向三维有限体数学模型。胡明显等人<sup>[28]</sup>通过三峡库区一复活岸坡监测数据的理论分析,表明它的运动轨迹具有分形特征。王俊杰等人<sup>[29]</sup>通过模型试验发现,库水位上升速率越大,均质水库岸坡的塌岸现象越易发生,并认为地下水浸没区的毛细力消失是引起塌岸的关键因素。张幸农等人<sup>[30]</sup>围绕渐进坍塌型崩岸建立了岸坡稳定的力学模型,并结合室内概化模拟试验和数值计算发现:岸坡坡脚未受水流冲失时,若坡内渗流出逸坡降下雨渗透破坏的临界坡降,岸坡处于稳定状态;当坡脚被水流冲失后,渗流渗径缩短,水土结合处坡面出逸坡降增大,大于临界坡降时则出现渗透破坏,引起局部小幅度土体崩塌。宋彦辉等人<sup>[31]</sup>对黄河上游茨哈峡水电站右坝肩顺层岩质斜坡进行分析评价后发现,该斜坡变形

的发展已初步形成潜在的折断面并处于蠕滑-拉裂变形阶段;吴松柏等人<sup>[32]</sup>通过河流弯道水槽试验,发现水流冲刷过程中岸坡破坏是水流淘刷岸坡坡脚、岸坡崩塌及崩塌体淤积坡脚,并在河床上分解、输移掺混中交互作用的反复循环过程。Zhang 等人<sup>[33]</sup>分析了拉瓦锡水电站右岸边坡蓄水前后变形稳定性,发现蓄水后岸坡水平位移达 7.5 m,表现为显著的突发性破坏模式。Min 等人<sup>[34]</sup>发现阳区水电站右岸边坡存在明显地集中卸荷区域,卸荷区产生的裂缝向下延伸并指向河流或高坡角岸坡内部。祁生文等人<sup>[35]</sup>认为岸坡变形破坏主要以压致拉裂、差异卸荷、重力蠕变-滑移-倾倒、结构沉陷等 4 种模式进行。Hubble<sup>[36]</sup>对澳大利亚 Nepean 河人工蓄水湖岸坡在波浪冲击作用下的稳定性变化及破坏问题进行了研究,发现岸坡侵蚀平均速度约为每年 10 cm。Tamrakar<sup>[37]</sup>采用能量分析研究了尼泊尔 Malekhu 河右岸巨型滑坡的倾倒和楔形体破坏机制。

总的来看,目前在水库岸坡破坏机制研究方面主要针对土质岸坡和岩质岸坡,未涉及类土质岸坡;重视库水位变化对岸坡破坏机制的作用,但忽视了对库水位上升过程中岸坡破坏过程的研究;未重视对库水位多旋回变动对岸坡破坏作用的研究。

### 1.3 库岸再造预测方法

苏联萨瓦连斯基院士在 1935 年首先提出了水库岸坡塌岸问题,认为库岸塌岸是因河道蓄水后水位抬高,吃水线与基岩岸坡相接触,岸壁的天然平衡条件遭到破坏而引起的,而波浪是库岸塌岸的主要动力因素之一。岸坡最终塌岸预测宽度的计算公式由苏联科学家卡丘金于 1949 年提出,该方法被为卡丘金法,它的实质是依据实测的洪枯水位变幅带各类岩土岸坡长期稳定坡角,根据几何关系用图解法求解岸坡最终塌岸预测宽度,然而该方法未考虑波浪影响范围以下部分岸坡的塌岸问题。河谷尤其是大的江河的岸坡已经被长期冲蚀、淤积,如今已经接近于平衡状态,在河流水力条件不发生明显改变的条件下,基本上会保持现有的岸坡形态;如果河流水力条件发生大的改变,在新的水力条件下,岸坡必然会进一步改变;在无人为干涉的情况下,经过一定时间的再造,岸坡又会趋于新的平衡状态。因此,马淑芝等人<sup>[38]</sup>认为预测库岸再造本质就是确定新条件下库岸的稳态坡形,从而提出了塌岸预测类比法:利用蓄水前的岸坡稳态坡形来类比库岸再造后的稳态坡形,用建库前岸坡稳态坡形各段坡角作为建库后库岸再造的稳态坡形相应的坡角。许强等人<sup>[39]</sup>通过对三峡库区数百段库岸的塌岸地质现场调查和预测分析的基础上,提出了类似三峡这种山区河道型水库的塌岸预测岸坡结构法,该方法属于一种类比图解法,主要适用于冲蚀型和坍塌型塌岸。陈洪凯等人<sup>[40]</sup>基于对卡丘金法存在的主要缺陷,提出了基于浪蚀龛和土体临界高度的卡丘金修正法。

## 2 水库岸坡地质灾害研究趋势

在水库运行期间,库水位存在着一年一度的周期性变动,如三峡水库自 2008 年 175 m 水位试验性蓄水以来,水库 145 m 至 175 m 地带处于一年一度的周期性浸泡状态。为了有效保护水库岸坡的地质环境,合理进行岸坡土地资源开发利用,应加强对水库岸坡地质环境效应、类土质岸坡变形与破坏等科学问题的研究,研发库岸地质灾害治理新技术新方法。

### 2.1 水库岸坡地质环境效应

水库运行期间岸坡的地质环境变化是一个长期的地质和力学行为,其中的地质环境效应是研发库岸地质灾害治理技术、有效评价岸坡地质灾害危险性的主要基础理论问题。初步研究表明,水库运行期间,岸坡地质环境存在缓变效应、突变效应和长期效应,其中缓变效应由岸坡稳定性衰减表征,突变效应表现为岸坡破坏过程,而长期效应则是指库岸再造宽度及再造时限问题,三者相互关系可用图 1 来表示。此外,从地质演化角度来看,水库岸坡的地质环境效应具有时序性(Time-ordered)、周期性(Periodism)、螺旋性(Helicity)、平衡态(再造极限)(Ultimate)等特征,如图 2 所示。因此,通过室内模型试验、现场长期定点观测,采用断裂力学、渗流力学、突变理论等研究方法,科学解译水库运行期间岸坡的地质环境效应,对于指导水库岸坡土地资源开发利用、

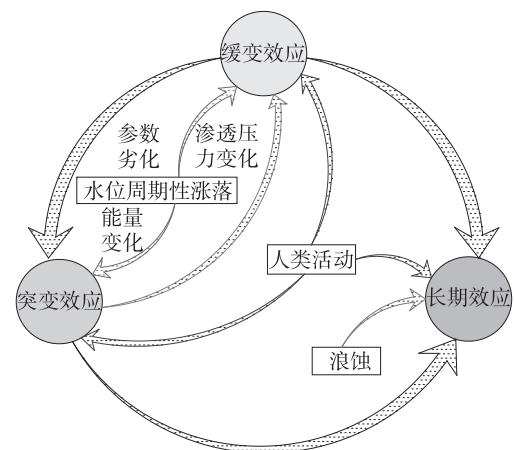


图 1 岸坡地质环境效应关系图

Fig. 1 The diagram of geological environment effect in bank slope

监测预警、灾害治理有积极意义。

## 2.2 类土质岸坡变形与破坏

类土质岸坡的变形与破坏问题是目前江河水库岸坡研究最薄弱的环节之一,而河流下切过程中岸坡出现明显的卸荷作用和风化作用并导致岩体结构破碎,是客观存在的现象。如位于长江三峡巫峡左岸的龚家方岸坡(封二彩图3),为一套滨海~浅海相碳酸盐岩与碎屑岩混相沉积层,岩性为灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩、页岩、砂岩、硅质岩,以碳酸盐岩为主。2008年三峡水库第一次175 m 试验性蓄水期间,于11月26日发生了第一次坍塌破坏(封二彩图4),体积 $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。水库正式运营蓄水后,于2011年9月29日再次发生坍塌破坏(封二彩图5),体积约 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。将类土质岸坡的破碎岩体进行等效处理,研究其物理力学参数在库水周期性浸泡条件下的劣化特性,据此实施库水位升降过程中类土质岸的变形与破坏特性研究,对于提升类土质岸坡变形与破坏本质特性的认知水平有积极意义。

## 2.3 水库岸坡地质灾害防治新技术

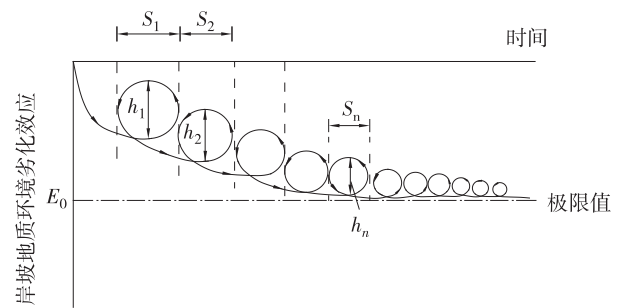
从三峡工程建设论证阶段开始,国内外相关学者便对三峡工程可能造成的生态环境问题进行研究论证,地质灾害是该项工作的核心内容之一。但是,直到2000年开始,政府部门才全面重视库区的地质灾害防治问题,先后实施了二期、三期地质灾害防治工作,投入了200多亿元用于库区地质灾害治理监测。而在此过程中,国内外学者主要集中对水库岸坡的地质灾害成因及机理进行研究,在有针对性的治理技术研究方面没有取得实质性进展。陈洪凯等人<sup>[41-43]</sup>围绕三峡水库岸坡库水位变动带滑坡治理需求,对预应力锚索抗滑桩的耐久性问题进行了研究,并初步提出了抗滑桩耐久性寿命预测方法;同时还从考虑岸坡库水位变动带内地下水位的周期性浸泡必然劣化预应力锚索工作性能出发,将悬臂抗滑桩和重力式挡土墙相结合,研发了桩-墙复合抗滑支挡治理方法——该技术可在一定程度上有效替代预应力锚索抗滑桩,满足支挡大型巨型滑坡需求,而又避免了地下水位变化对预应力锚索造成的不利影响。但是总体而言,水库岸坡地质灾害防治技术目前仍然缺乏,研发新技术新方法,仍然是当前及今后相当长时间内库区地质灾害防治的主要工作之一。

## 3 总结

通过对水库岸坡地质灾害研究现状与趋势进行梳理和分析后可以得到以下几点结论:1) 针对土质岸坡及岩质岸坡,国内外学者从库水位升降造成的岸坡地下水渗流特性和渗透压力出发,对岸坡的稳定性变化进行了系统研究,认为库水位降落是岸坡稳定性降低的主要原因;2) 重视对库水位引起岸坡破坏问题的研究,提出了多个土质岸坡及岩质岸坡破坏模型,并将库水位降落作为岸坡地质灾害工程防治的设计工况;3) 针对土质岸坡及岩质岸坡的库岸再造问题,在卡丘金法基础上提出了多个库岸再造宽度预测修正方法;4) 鉴于目前缺乏对土体物理力学参数在库水位周期性浸泡条件下的劣化特性及库水位多旋回变动对岸坡破坏作用等科学问题的深入研究,指出了水库岸坡地质灾害进一步研究应予以高度重视的3个方向:水库岸坡地质环境效应、类土质岸坡变形与破坏、库岸地质灾害治理新技术新方法。

### 参考文献:

[1] 伍法权. 中国21世纪若干重大工程地质与环境问题[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 115-120.  
Wu F Q. Major engineering-geological and environmental problems in China in 21st century[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2): 115-120.



注: $h$ 指水库岸坡被库水一次浸泡周期所表现出的地质环境变化幅度( $h_1$ 指水库岸坡在第1次周期性浸泡所表现出来的地质环境变化幅度,以此类推); $S$ 指水库岸坡被库水一次浸泡周期所表现出的地质环境变化历时( $S_1$ 指水库岸坡在第1次周期性浸泡所表现出的地质环境变化历时,以此类推); $E_0$ 指水库岸坡在库水位多年周期性浸泡作用后地质环境的稳定极限。

图2 岸坡地质环境效应关系图

Fig. 2 Evolution model of geological environment effect in bank slope

[2] 陈洪凯,唐红梅. 三峡库区大型滑坡发育机理[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2009, 26(4): 1-6.  
Chen H K, Tang H M. Developing mechanism of giant landslides in the area of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition,

- 2009,26(4):1-6.
- [3] 董金玉,杨继红,孙文怀,等. 库水位升降作用下大型堆积体边坡变形破坏预测[J]. 岩土力学,2011,32(6):1774-1780.  
Dong J Y, Yang J H, Sun W H, et al. Prediction of deformation and failure of a large-scale deposit slope during reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(6):1774-1780.
- [4] 杨金,简文星,杨虎锋,等. 三峡库区黄土坡滑坡浸润线动态变化规律研究[J]. 岩土力学,2012,33(3):853-858.  
Yang J, Jian W X, Yang H F, et al. Dynamic variation rule of phreatic line in Huangtupo landslide in Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 853-858.
- [5] 吴琼,唐辉明,王亮清,等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学,2009,30(10):3025-3031.  
Wu Q, Tang H M, Wang L Q, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(10):3025-3031.
- [6] 林志红,项伟,吴琼. 库水位涨落和降雨入渗作用下岸坡中浸润线的计算[J]. 安全与环境工程,2008,15(4):22-26.  
Lin Z H, Xiang W, Wu Q. Calculation of shallow water table in bank slope under the combination of rainfall and reservoir fluctuation conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2008,15(4):22-26.
- [7] 周丽,汪洋,杜娟. 库水位下降和降雨影响下李家湾滑坡的稳定性计算[J]. 安全与环境工程,2010,17(3):5-9.  
Zhou L, Wang Y, Du J. Calculation of Lijiawan landslide stability under the drawdown and rainfall conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010,17(3):5-9.
- [8] 许强,陈建君,张伟. 水库塌岸时间效应的物理模拟研究[J]. 水文地质工程地质,2008(4):58-61.  
Xu Q, Chen J J, Zhang W. The study of the time effect of bank collapse by physical modeling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(4):58-61.
- [9] 肖诗荣,刘德富,姜福兴,等. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):1023-1030.  
Xiao S R, Liu D F, Jiang F X, et al. Geomechanical model experiment on Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(5):1023-1030.
- [10] 徐文杰,王立朝,胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1491-1498.  
Xu W J, Wang L C, Hu R L. Fluid-solid coupling characteristics and stability analysis of soil-rock mixture slope in rising and drawdown of reservoir water levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(7): 1491-1498.
- [11] 江泊洳,项伟,曾雯,等. 三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩(土)相互作用机理[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1209-1217.  
Jiang J W, Xiang W, Zeng W, et al. Water-rock(soil) interaction mechanism of Huangtupo riverside landslide in Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(7):1209-1217.
- [12] 汪发武,张业明,王功辉,等. 三峡库区树坪滑坡受库水位变化产生的变形特征(英文)[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):509-517.  
Wang F W, Zhang Y M, Wang G H, et al. Deformation features of Shuping landslide caused by water level changes in Three Gorges reservoir area, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3): 509-517.
- [13] Zhou X G, Chu M J, Liu J M, et al. Deformation and failure of Guantianba landslide, in the reservoir of Xiangjiaba hydropower station[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,166/167/168/169:2782-2786.
- [14] Lollino P, Elia G, Cotecchia F, et al. Analysis of landslide reactivation mechanisms in Daunia clay slopes by means of limit equilibrium and FEM methods[C]//Fratta D O, Puppala A J, Muhunthan B. GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling & design. U. S. A. : American Society of Civil Engineers, 2010:3154-3164.
- [15] Deng J H, Wei J B, Min Hong, et al. Response of an old landslide to reservoir filling: a case history[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2005,48(z1):27-32.
- [16] Lai X L, Wang S M, Qin H B, et al. Unsaturated creep tests and empirical models for sliding zone soils of Qianjiangping landslide in the Three Gorges[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(2):149-154.
- [17] 蒋秀玲,张常亮. 三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性评价[J]. 水文地质工程地质,2010,37(6):38-42.  
Jiang X L, Zhang C L. Stability assessment for the landslide undergoing the effects of water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010,37(6):38-42.
- [18] 梁学战,赵先涛,向杰,等. 库水位升降作用下土质岸坡变形特征实验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(1):92-100.  
Liang X Z, Zhao X T, Xiang J, et al. Experimental analysis of deformation characteristic for soil bank slope under reservoir water level fluctuation[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2014,36(1):92-100.

- [19] 王小东,戴福初,黄志全. 基于瑞典条分法进行水库岸坡最危险滑动面自动搜索的 GIS 实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3129-3134.  
Wang X D, Dai F C, Huang Z Q. Realization of automated searching by GIS for most dangerous slip surface of reservoir bank slope based on Swedish slice method[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3129-3134.
- [20] 卢书强,易庆林,易武,等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1123-1130, 1202.  
Lu S Q, Yi Q L, Yi W, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1123-1130.
- [21] 宋琨,晏鄂川,朱大鹏,等. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2798-2802.  
Song K, Yan E C, Zhu D P, et al. Base on permeability of landslide and reservoir water change to research variation-regularity of landslide stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2798-2802.
- [22] Midgley T L, Fox G A, Wilson G V, et al. Seepage-induced stream bank erosion and instability: in situ constant-head experiments[J]. J Hydrol Eng, 2013, 18(10): 1200-1210.
- [23] Kukemilks K, Saks T. Landslides and gully slope erosion on the banks of the Gauja River between the towns of Sigulda and Ligatne[J]. Estonian Journal of Earth Sciences, 2013, 62(4): 231-243.
- [24] Nian T K, Feng Z K, Yu P C, et al. Strength behavior of slip-zone soils of landslide subject to the change of water content[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2): 711-721.
- [25] 张桂荣,程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 476-483.  
Zhang G R, Cheng W. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(s1): 476-483.
- [26] 廖秋林,李晓,李守定,等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3146-3153.  
Liao Q L, Li X, Li S D, et al. Occurrence, geology and geomorphology characteristics and origin of Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3146-3153.
- [27] Bosa S, Petti M. Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(4): 406-418.
- [28] 胡显明,晏鄂川,周瑜,等. 滑坡监测点运动轨迹的分形特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 570-576.  
Hu X M, Yan E C, Zhou Y, et al. Fractal characteristics of landslide monitoring point movement trace and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 570-576.
- [29] 王俊杰,刘元雪. 库水位等速上升中均质库岸塌岸现象及浸润线试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3231-3236.  
Wang J J, Liu Y X. Experimental study of homogeneous bank caving and phreatic line during uniform rising water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3231-3236.
- [30] 张幸农,陈长英,假冬冬,等. 渐进坍塌型崩岸的力学机制及模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 246-252.  
Zhang X N, Chen C Y, Jia D D, et al. Mechanisms of gradual riverbank collapses and simulation study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 246-252.
- [31] 宋彦辉,黄民奇,陈新建. 黄河上游茨哈峡水电站右坝肩顺层岩质斜坡破坏模式分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 51-56.  
Song Y H, Huang M Q, Chen X J. Failure pattern of the rock slope of right dam abutment of Cihaxia power station located at the upstream of the Yellow river[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 51-56.
- [32] 吴松柏,余明辉. 冲积河流塌岸淤床交互作用过程与机理的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 649-657.  
Wu S B, Yu M H. Experimental study on bank failure process and interaction with riverbed deformation due to fluvial hydraulic force[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 649-657.
- [33] Zhang D X, Wang G H, Yang T J, et al. Satellite remote sensing-based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower station, China [J]. Landslides, 2013, 10(2): 231-238.
- [34] Min X, Guang M R. Characteristics and mechanism of concentrated unloading in bank slope of Yangqu hydropower station[J]. Journal of the Geological Society of India, 2013, 82(4): 421-429.
- [35] 祁生文,伍法权,常中华,等. 三峡地区奉节县城缓倾层状岸坡变形破坏模式及成因机制[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 88-91.  
Qi S W, Wu F Q, Chang Z H, et al. Mechanism and model for deformation of bank slope with slightly inclined soil layers in Fengjie county of Three Gorges [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 88-91.
- [36] Hubble T C T. Slope stability analysis of potential bank failure as a result of toe erosion on weir-impounded lakes: an example from the Nepean river, New South Wales, Australia[J]. Marine and Freshwater Research, 2004, 55

- (1):57-65.
- [37] Tamrakar N K, Singh J L, Bista K K, et al. Toppling and wedge failures in Malekhu river area, Malekhu, Central Nepal Lesser Himalaya[J]. Bulletin of the Department of Geology, 2013, 16: 21-28.
- [38] 马淑芝, 贾洪彪, 唐辉明. 利用稳态坡形类比法预测基岩岸坡的库岸再造[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(2): 231-233.
- Ma S Z, Jia H B, Tang H M. Analogy method with stable shape to predict reservoir side rebuilding of rock shore [J]. Earth Science- Journal of China university of Geosciences, 2002, 27(2): 231-233.
- [39] 许强, 刘天翔, 汤明高, 等. 三峡库区塌岸预测新方法—岸坡结构法[J]. 水文地质工程地质, 2007(3): 110-115.
- Xu Qi, Liu T X, Tang M G, et al. A new method of reservoir bank-collapse prediction in the Three Gorges reservoir—river bank structure method[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007(3): 110-115.
- [40] 陈洪凯, 赵先涛, 唐红梅, 等. 基于浪蚀龛和土体临界高度的卡丘金修正法及其工程应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1095-1100.
- Chen H K, Zhao X T, Tang H M, et al. Modified Kachugin method based on wave cut notch and critical height of soil and its engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1095-1100.
- [41] 陈洪凯, 易丽云, 鲜学福, 唐红梅. 酸-应力耦合作用下抗滑桩性能试验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2009, 32(1): 61-66.
- Chen H K, Yi L Y, Xian X F, et al. Anti-sliding pile performance under acid-stress-coupling [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2009, 32(1): 61-66.
- [42] 易丽云, 唐红梅, 陈洪凯. 抗滑桩耐久性寿命预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 94-99.
- Yi L Y, Tang H M, Chen H K. A method to predict anti-slide pile's durability lifespan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(3): 94-99.
- [43] 陈洪凯, 唐兰, 唐红梅. 桩-墙复合抗滑支挡治理方法: 中国, 201210251209. 6[P]. 2012-10-17.
- Chen H K, Tang L, Tang H M. Composite anti-sliding pile wall retaining governance approach: China, 201210251209. 6[P]. 2012-10-17.

## Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

### The Status Quo and Trend to Study Geological Disaster in Bank Slope of Reservoir

CHEN Hongkai, ZHOU Xiaohan, ZHOU Xiaohan, TANG Hongmei, ZHOU Yuntao

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The science problem for geological disasters control and reduction of reservoir bank slope is the important segment for ecological environment protection in reservoir area, especially for geological environment protection. By means of consulting and analyzing domestic and overseas research literatures, and combing the author's study practice for ages in the Three Gorges Reservoir, this paper was to generalize the research status of geological disasters of reservoir bank slope to three aspects, i. e., stability change of reservoir bank slope, failure mechanism, prediction method of reservoir bank rebuilding, and tease each aspect's research situation. It can be learnt that domestic and foreign scholars attached great attention to stability and deformation damage characters of the soil and rock bank slope by the influence of reservoir drawdown, also, based on the Kachugin method multiple new predicting bank rebuilding methods were proposed. However, studies on the bank slope impacted by multicycle change of reservoir water level, physical and mechanical degradation characteristics of the soil and rock by cyclic water soaking and earthy bank slope, etc. were less. In addition, the author pointed out that the further research on geological disasters of reservoir bank slope should be attached high attention to three study direction, i. e., geological environment effect of reservoir bank slope, deformation and failure mechanism of earthy bank slope, new tackling technique and method for geological disasters of reservoir bank slope. Research achievements in promoting the geological disaster reduction theory of reservoir bank slope and the disaster reduction technology research and reasonably planning and making use of land resources of bank slope have a positive meaning.

**Key words:** geological disaster; bank slope of reservoir; research status; research trend

(责任编辑 方 兴)