

库岸边坡 水-岩作用

邓华锋 李建林 王孔伟 孙旭曙 / 著



water-rock
interaction
in reservoir slope



科学出版社

库岸边坡水-岩作用

邓华锋 李建林 王孔伟 孙旭曙 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍作者近年来在三峡库区库岸边坡水-岩作用方面开展的一些研究工作。包括水库正常运营过程中库水位变化的阶段性影响机理, 水库运营期的库岸边坡水-岩作用机制, 考虑裂隙水压力的裂纹扩展规律及断裂判据, 岩石力学试验试样的选择、强度预测方法, 岩石力学系列对比试验中的强度修正思路与方法, 浸泡-风干循环水-岩作用下典型砂岩的抗压强度、抗拉强度、断裂韧度、弹性模量、变形模量、黏聚力、摩擦角、纵波波速、回弹值等物理力学参数劣化规律以及岩石矿物的组成与结构、孔隙率等微观结构变化特征, 水-岩作用下损伤砂岩的物理力学劣化规律, 水-岩作用下砂岩动弹性模量、阻尼比、阻尼系数等动力响应特征变化规律, 水-岩作用下砂岩的劣化机理、损伤演化方程和考虑压密效应的分段统计损伤本构方程等内容。

本书可作为岩土工程、水利水电工程、地质工程、减灾防灾与防护工程等相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书, 也可供有关科研和工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

库岸边坡水-岩作用 / 邓华锋等著. — 北京: 科学出版社, 2016.7

(水电工程关键技术及应用丛书)

ISBN 978-7-03-049392-7

I. ①库… II. ①邓… III. ①水库-边坡-水岩作用-研究 IV. ①TV697.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 164449 号

责任编辑: 杨 岭 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本: B5

2016年7月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 230千字

定价: 69.00元

序

水-岩相互作用在自然界广泛存在,水是诱发各种地质灾害最活跃、最主要的因素。随着我国一大批水利水电工程的建设,岸坡岩土体长期处在反复浸泡-风干的动态水-岩作用过程中,以致岸坡岩土体物理力学性质不断劣化,诱发崩塌、滑坡等自然灾害,造成严重的经济损失和人员伤亡。因此,水-岩作用导致库岸边坡稳定性问题是十分严峻而又不可避免的现实问题。我很高兴地看到,作者围绕三峡库区库岸边坡水-岩作用这一问题,针对库岸边坡的稳定性开展了大量的理论分析和创新性的试验研究,取得了令人欣慰的成果。

《库岸边坡水-岩作用》一书首先从理论上详细分析了库岸边坡水-岩作用机理,提出了库水涨落情况下库岸边坡分段的研究方法,将库岸边坡水-岩作用机制概括为五个方面,重点分析了浸泡-风干循环作用累积损伤机制,并从断裂力学角度分析了库水位升降对裂隙岩体断裂因子及裂纹扩展规律的影响,这些都是对水-岩作用机理认识的深化。针对岩石力学试验过程普遍存在的离散性问题,提出了将超声-回弹综合法应用到岩石试样的选择、强度预测,分析提出了岩石力学系列对比试验中的强度修正思路与方法,这样有利于更好地把握试验规律。

基于自主研发的专用岩石浸泡试验仪器,模拟库岸边坡消落带岩体的实际赋存环境,设计了考虑水压力升降变化和浸泡-风干耦合作用的水-岩作用试验方案。结合三峡库区典型库岸边坡消落带砂岩,对水-岩作用下岩石的抗压强度、抗拉强度、断裂韧度、弹性模量、变形模量、粘聚力、摩擦角、纵波波速、回弹值等物理力学参数劣化规律以及岩石矿物组成与结构、孔隙率等微观结构变化特征进行了系统的分析;提出了基于离子浓度变化计算岩体中次生孔隙率的方法,为现场监测库岸边坡消落带岩体的次生孔隙率发育情况提供了很好的思路。考虑水库地震作用的影响,对水-岩作用下损伤砂岩的物理力学劣化规律和砂岩动弹性模量、阻尼比、阻尼系数的等动力响应特征进行了深入的研究。分析得到了水-岩作用下库岸边坡消落带砂岩损伤劣化机理,建立水-岩作用下考虑压密效应的分段统计损伤本构方程。研究结果对认识库岸边坡水-岩作用提供了重要依据,为库岸边坡的变形破坏分析和长期稳定性评价提供了比较重要的科学依据。

该书选题新颖，内容丰富，数据翔实，相关理论分析和试验研究均具有明显的创新性，该书的出版将丰富库岸边坡水-岩作用的研究方法和内容，特别是对库岸边坡消落带岩体设计研制的专用仪器设备和试验方法将为库岸边坡水-岩作用提供很好的研究思路。



2016年05月08日于武汉

前 言

为了解决调洪、发电、灌溉和供水等重大国民经济发展问题,我国已先后建成了数量众多的各类大型水利水电工程,而且还有一大批规模较大甚至巨大的水利水电工程正在兴建或即将兴建,这些工程的建设无疑会缓解我国电力紧张的局面,促进国民经济建设和社会发展。但这些大型水库的出现,往往会打破库区多年来自然形成的各种生物、环境、地质、力学等平衡状态,进而引发一系列新的自然灾害问题,其中,库岸边坡变形失稳就是近年来凸显而且亟待解决的问题之一。

水库蓄水,水位大幅度上升,不仅会改变库岸边坡表面的荷载状态,还会改变边坡内部的渗流场、化学场和应力场等。在水库诱发库岸边坡失稳的机理讨论中,许多研究者都提起水对岩土介质的“弱化”作用,即饱和岩体的强度降低;同时,由于防洪和发电等要求,库水位需要在一个较大的范围内升降变化,在水库大幅度涨落的条件下,库岸边坡变幅带部分岩土体周期性地处于疏干和饱和交替的动态,地下水时而受库水补给,时而排出,使库岸边坡部分岩土体处于饱和—风干的交替动态,这种交替作用对岩土体来说是一种“疲劳作用”,将造成岩体性质劣化,每一次的效应并不一定很显著,但多次重复作用后,损伤效应可能会累积性发展;而且,库水在动态变化的同时,可能还伴随暴雨的影响,进而引起库岸边坡库水位以上的岩土体含水率的变化,地下水位的变化,坡体内部由于含水率的变化而引起应力的重新分布等,这些环境因素的改变会使库岸边坡原有的平衡状态改变,很可能使稳定的库岸边坡向不稳定方向发展,而以往对这一过程的详细机理尚缺乏深入的研究。

长江三峡水库是一个典型的河谷型水库,库区跨越渝东和鄂西地区,库区两岸城市、集镇分布密集。三峡工程竣工后,库水每年都将按“冬蓄夏洪”的调度计划在 145m 的防洪水位和 175m 的蓄水发电水位之间或缓慢或快速地升降。在约 600km 长的河道两岸形成高差为 30m 的消落带,范围涉及湖北省 4 个县和重庆市 22 个县(区)。自 2003 年 6 月三峡工程成功下闸蓄水以来,一些库岸边坡逐渐出现变形和失稳的情况,而且经历数次库水位大幅度反复升、降变化以来,库岸边坡稳定问题日益凸显。

作者针对库岸边坡水—岩相互作用这一问题,围绕水—岩作用效应和作用机理进行深入理论分析和试验研究。研究过程中先后得到了湖北省自然科学基金项目“水—岩作用下砂岩断裂力学特性及参数相关性研究”(2012FFB03805)、国

国家重点基础研究发展计划(973 计划)前期研究专项“大型水电工程库岸边坡致灾机理及稳定评价理论研究”(2012CB426502)、国家自然科学基金项目“循环荷载与水-岩次序作用下砂岩损伤力学特性研究”(51309141)、水利部公益性行业科研专项经费项目“岸坡安全生命周期诊断评价与防护新技术示范”(201401029)、湖北省自然科学基金重点项目“水-岩作用下节理岩体力学特性劣化机理研究”(2015CFA140)和三峡大学青年拔尖人才培养计划项目“岸坡稳定及水-岩作用”(KJ2014H011)等项目的资助。本书是作者多年关于库岸边坡水-岩作用研究成果的系统总结。

全书共 10 章,主要包括如下内容。

第 1 章主要分析库岸边坡水-岩作用的研究背景和意义,并对库岸边坡变形稳定的影响因素、分析方法和库岸边坡水-岩作用研究现状进行了详细论述,介绍了课题组研发的专用岩石浸泡仪器——YRK-1 岩石溶解试验仪,最后,详细介绍了本书的主要研究内容、思路和方法。

第 2 章对库岸边坡随库水涨落的稳定性进行科学的分段,详细分析了库水位升、降对库岸边坡岩体的力学作用,从力学机理上解释库岸边坡在水位上升或下降过程中安全系数先下降后上升的变化规律的原因。将水库运营期的水-岩作用机制概括为五个方面:力学弱化机制、局部应力集中机制、物理弱化机制、化学弱化机制、浸泡-风干循环作用累积损伤机制,这样可以更全面地分析岸坡的水-岩循环作用效应和作用机理。从断裂力学角度分析裂隙水压力对裂纹强度因子的影响,对考虑裂隙水压力作用的 I~II 型复合裂纹扩展规律进行研究,推导基于摩尔-库仑屈服准则考虑裂隙水压力的岩体闭合裂纹断裂韧度 K_{IC} 、 K_{IIC} 和压剪状态下 I、II 型复合断裂判据。

第 3 章将超声一回弹综合法应用于岩石试样的筛选,能较好地识辨、衡量岩样之间的差异,试验前可以挑出那些可能会使试验结果离散的试样,控制试验结果的离散性,提高室内试验的准确程度;基于岩石抗压强度与岩石纵波波速、回弹值之间有较好的相关性,建立岩石抗压强度与纵波波速、回弹值的多元回归模型,模型验证结果表明综合经验公式的预测强度值是可信的,而且比以往单纯用声波或回弹法预测岩石抗压强度经验公式的准确程度要高。提出基于纵波波速和回弹值的抗压强度修正方法,这个过程相当于把每个岩样的初始强度修正到同一个标准,然后再进行比较分析,这样可以更好地把握某种或者多种外界因素作用(如水-岩作用、干-湿循环、化学溶液浸泡、冻融循环等)对岩石力学性质的影响。

第 4 章设计并进行模拟库水位动态变化和浸泡-风干循环作用过程的水-岩作用试验,为了研究不同水压力变化的影响,采用 3 种试验方案:静水常压、静水加压(浸泡压力:0.4MPa)、静水加压(浸泡压力:0.8MPa),同时考虑时间效

应的影响。分析得到水—岩作用下砂岩的抗压强度、弹性模量、变形模量、黏聚力、摩擦角等力学参数劣化规律和变形破坏特征。

第5章考虑水库地震和库水大幅度升、降的加卸载效应,对损伤砂岩进行考虑库水压力升、降变化和浸泡—风干循环的水—岩作用试验,对损伤岩样在水—岩作用下的劣化效应和机制进行详细的分析。与“完整”砂岩试样相比,在浸泡—风干循环过程中,循环加卸载损伤试样的各项物理力学参数衰减得更快,破坏时的破碎程度要严重得多,这说明损伤岩体对水的软化作用更加敏感,同时也能较好地解释一些震后边坡在浸泡或者降雨时出现失稳的原因。

第6章对饱水和干燥两种砂岩试样进行3点弯曲断裂韧度和抗压强度、抗拉强度试验,得到砂岩Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 与抗压强度,抗拉强度, c 、 φ 值等力学参数;并从理论上分析岩石Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 与抗拉强度之间的关系,结合大量试验数据进行了验证,分析成果为以往的岩石Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 与抗拉强度之间的数据统计拟合公式提供理论基础。设计并进行考虑长期浸泡和浸泡—风干循环作用的砂岩断裂试验,分析得到水—岩作用下砂岩的断裂力学特性劣化规律。

第7章考虑水库运营过程中可能遭遇地震作用,对浸泡—风干循环水—岩作用过程中的砂岩进行循环加卸载动力响应试验研究,分析得到水—岩作用过程中砂岩的阻尼系数、阻尼比和动弹性模量的变化规律,浸泡—风干循环作用对岩石动力特性的损伤是一种累积性发展的过程,每一次的效应并不一定很显著,但多次重复发生,却可使效应累积性增大。

第8章主要从微观层面对浸泡—风干循环水—岩作用下岩石损伤机制进行研究,一方面,通过定期对浸泡离子成分和浓度进行检测分析,确定矿物质的反应程度和反应速度,建立离子浓度变化序列表,并根据离子成分和离子浓度的变化,结合化学的方法分析岩石试样孔隙率的变化规律;另一方面,对不同浸泡—风干循环作用次数的岩石试样的孔隙率进行测试;同时,对不同浸泡—风干循环作用次数的岩石试样进行显微结构特征、矿物成分和含量分析;最后,结合这三个方面的测试结果,分析浸泡—风干循环作用下砂岩的孔隙率变化规律,确定岩石组成矿物发生化学反应的类型和程度,研究浸泡—风干循环作用下岩石损伤劣化的微观机理,同时结合岩样的纵波波速和回弹值测试,综合分析评价岩样的微观结构损伤。

第9章在前述章节浸泡—风干循环水—岩作用试验数据分析的基础上,根据水—岩作用过程中砂岩三轴压缩试验应力—应变曲线的特点,借助连续损伤力学和统计理论,将浸泡—风干循环水—岩作用的损伤效应直接耦合到损伤统计本构模型中,并重点考虑压密段的影响,分段建立水—岩作用下砂岩的统计损伤本构方程。对比分析表明,所建立的分段统计损伤本构模型计算曲线与试验曲线符合较好。

第10章主要对本书的研究成果进行归纳总结,并对将来的研究方向进行展望。

在本书研究过程中,大部分试验内容都是在三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)进行,得到三峡大学土木与建筑学院各级领导和同事们的关心和支持。在本书研究中,易庆林教授、王乐华教授、张振华教授、黄宜胜副教授、李新哲副教授、郭永成副教授、王瑞红副教授、刘杰副教授、赵二平副教授、王宇副教授、王兴霞副教授给予了很多建议和支持;工作室的宛良朋博士、许晓亮博士、陈将宏博士、段国勇博士、张景昱博士、骆祚森博士等参加了部分研究工作,硕士研究生邓成进、陈星、鲁涛、郭靖、朱敏、原先凡、罗骞、曹毅、姜桥、胡亚运、周美玲、肖志勇、胡玉、王哲、张小景、常德龙、李春波、胡安龙、肖瑶、张恒宾、方景成、王晨玺杰等在试验过程中付出了辛勤的劳动,在此,一并表示衷心的感谢!

由于时间关系和作者水平有限,书中的研究成果难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正!

作 者

2015.12.27

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 库岸边坡水-岩作用研究背景及意义	1
1.2 库岸边坡水-岩作用国内外研究现状分析	5
1.2.1 库岸边坡变形稳定研究现状分析	5
1.2.2 库岸边坡水-岩作用研究现状分析	7
1.3 研究内容和思路	11
1.3.1 主要研究内容	11
1.3.2 研究技术路线	14
1.4 专用水-岩作用试验设备研制	14
1.5 小结	15
第 2 章 水库正常运营过程中库岸边坡水-岩作用研究	16
2.1 库水位升、降变化对库岸边坡变形稳定的影响	17
2.1.1 库水位上升期水-岩力学作用机理分析	17
2.1.2 库水位下降期水-岩力学作用机理分析	20
2.1.3 库水位升、降变化时典型库岸滑坡稳定性分析	21
2.2 库水位相对稳定期的水-岩物理、化学作用分析	23
2.3 库水位反复升、降变化导致的浸泡-风干循环水-岩作用	25
2.4 考虑裂隙水压力的裂纹应力强度因子分析	29
2.4.1 水压力作用下裂纹 I 型应力强度因子	30
2.4.2 水压力作用下裂纹 II 型应力强度因子	30
2.4.3 考虑水压力作用的 I~II 型复合裂纹扩展研究	31
2.4.4 考虑裂隙水压力的岩体压剪断裂判据	35
2.5 小结	37
第 3 章 岩石力学试验试样选择、强度预测与修正研究	39
3.1 岩石力学试验结果离散性的影响因素分析	40
3.2 岩石力学试样选择、强度预测方法研究	41
3.2.1 常用无损检测技术的基本原理	41
3.2.2 超声波对岩石内部缺陷的识辨能力	42

3.3 超声一回弹综合法测试与分析	43
3.3.1 超声一回弹综合法强度预测实例分析	43
3.3.2 关于超声一回弹综合法的说明	46
3.4 岩石力学系列对比试验中抗压强度修正方法研究	47
3.4.1 离散性对岩石力学系列对比试验的影响	47
3.4.2 岩石力学系列对比试验中强度修正方法研究	48
3.4.3 岩石力学系列对比试验中强度修正实例及分析	49
3.4.4 岩石力学系列对比试验中强度修正方法的讨论	52
3.5 小结	53
第4章 水-岩作用下砂岩力学特性劣化规律研究	54
4.1 考虑浸泡-风干循环的水-岩作用试验方案设计	54
4.1.1 岩样制备与选择	54
4.1.2 浸泡-风干循环水-岩作用试验方案	55
4.2 三轴压缩作用下砂岩应力-应变特性分析	56
4.3 砂岩试样弹性模量、变形模量变化规律	58
4.4 砂岩试样抗压强度变化规律分析	64
4.5 砂岩试样抗剪强度参数劣化规律分析	66
4.6 砂岩试样破坏形态研究	68
4.7 小结	73
第5章 水-岩作用下损伤砂岩力学特性劣化规律研究	75
5.1 损伤砂岩水-岩作用试验设计	76
5.1.1 损伤砂岩试样制作	76
5.1.2 水-岩作用试验方案	77
5.2 水-岩作用下损伤砂岩纵波波速、回弹值变化规律	77
5.3 损伤砂岩的抗压强度劣化规律	81
5.4 水-岩作用下损伤砂岩和“完整”砂岩劣化规律比较	83
5.5 水-岩作用下损伤砂岩力学特性劣化机制分析	84
5.6 小结	87
第6章 水-岩作用下砂岩断裂力学特性劣化规律研究	88
6.1 砂岩Ⅰ型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究	88
6.1.1 试验方案设计	89
6.1.2 砂岩Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 试验结果及分析	91

6.1.3	砂岩抗压、抗拉强度试验结果及分析	92
6.1.4	砂岩 I 型断裂韧度 K_{IC} 与强度参数相关性分析	94
6.2	水-岩作用下砂岩断裂力学特性劣化规律试验研究	99
6.2.1	试样制备与选择	99
6.2.2	试验方案设计	99
6.3	水-岩作用下砂岩断裂特性劣化规律	101
6.3.1	砂岩试样断裂韧度变形特征分析	101
6.3.2	水-岩作用下砂岩断裂力学特性劣化规律	102
6.3.3	断裂韧度与抗拉强度相关性讨论	105
6.4	小结	107
第 7 章	水-岩作用砂岩动力特性劣化规律研究	108
7.1	试验方案设计	108
7.1.1	试样制作	108
7.1.2	试验方案	109
7.2	循环荷载作用下的动力响应分析原理	110
7.2.1	循环荷载作用下动力响应计算原理	110
7.2.2	循环荷载作用下动力响应简化计算公式	112
7.3	水-岩作用下砂岩动力特性劣化规律分析	113
7.4	水-岩作用下砂岩动力特性劣化机制探讨	117
7.5	小结	118
第 8 章	水-岩作用砂岩微观结构变化规律及机理研究	120
8.1	岩石试样特征和试验方法	120
8.1.1	岩石试样的特征分析	120
8.1.2	试验方法	121
8.2	浸泡溶液离子浓度变化规律分析	121
8.3	水-岩作用下砂岩次生孔隙率变化规律分析	126
8.3.1	基于离子浓度变化的次生孔隙率分析	126
8.3.2	砂岩实测次生孔隙率变化规律	129
8.4	砂岩试样的纵波波速、回弹值变化规律	130
8.5	水-岩循环作用下砂岩试样微观结构变化及劣化机理分析	134
8.6	小结	136

第 9 章 水-岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型	139
9.1 水-岩作用下砂岩力学参数劣化规律	139
9.2 水-岩作用下砂岩损伤变量的确定	141
9.2.1 损伤变量的确定	141
9.2.2 岩石微元强度的确定	142
9.3 水-岩作用下砂岩统计损伤本构模型	143
9.3.1 水-岩作用下砂岩统计损伤本构方程	143
9.3.2 水-岩作用下砂岩统计损伤本构方程参数的确定	145
9.3.3 水-岩作用下砂岩统计损伤本构模型的验证	147
9.4 小结	149
第 10 章 研究结论及展望	150
10.1 主要研究结论	150
10.1.1 水库正常运营过程中库岸边坡水-岩作用分析	150
10.1.2 岩石力学试验试样选择和强度预测、修正研究	151
10.1.3 水-岩作用下砂岩力学特性劣化规律研究	152
10.1.4 水-岩作用下损伤砂岩力学特性劣化规律研究	153
10.1.5 水-岩作用下砂岩断裂力学特性劣化规律研究	153
10.1.6 水-岩作用砂岩动力特性劣化规律研究	154
10.1.7 水-岩作用砂岩微观结构变化规律及机理研究	155
10.1.8 水-岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型	156
10.2 研究展望	156
参考文献	158

第 1 章 绪 论

1.1 库岸边坡水-岩作用研究背景及意义

水利水电工程是人类改造自然、利用自然的重要途径,具有防洪、发电、灌溉、航运、养殖、供水、旅游等综合效益。我国已先后建成了数量众多的各类水利水电工程,而且目前还有一大批规模较大的水利水电工程正在兴建或即将兴建,这些民生水利工程的建设无疑会缓解我国防洪、灌溉、饮水以及电力紧张的局面,促进国民经济建设和社会发展。但这些水利工程的出现,往往会打破库区多年来自然形成的各种生物、环境、水文、地质、力学等平衡状态,特别是地表水和地下水环境的重大变化,不仅会改变库岸边坡表面的荷载状态,而且会改变边坡内部的渗流场、化学场和应力场等,进而加剧原来的水-岩作用进程,而且会促进一些新形式的水-岩作用发展。这些作用不仅会改变岩土体的状态,而且会逐渐改变其结构和成分,导致岩土体力学性质逐渐劣化,进而引发一系列新的自然灾害问题。大量统计资料表明,已建成的大量各类水库中,库岸崩滑的发育是相当普遍的。

库岸地带发生的崩塌和滑坡是库区水-岩作用导致的一类重要地质灾害,往往会对工程及环境造成较大的影响。例如,意大利瓦依昂水库滑坡就是一个最典型的实例,该水库大坝高 267m,1960 年 9 月竣工,是当时世界上最高的超薄双曲拱坝,1960 年 2 月开始蓄水,1960 年 9 月完成蓄水,坝前水位 130m。1963 年 10 月 9 日,大坝上游左岸山体突然发生体积为 2.4 亿 m^3 的超巨型滑坡,滑坡速度高达 $25 \sim 30 \text{ m/s}$,掀起的库浪高出坝顶 125m,约 2500 万 m^3 的库水翻坝而过,摧毁了坝下游 3km 处的隆加罗内市(Longarone)及数个村镇,造成 2000 余人遇难,并使全部工程失效(王兰生,2007),如图 1.1 所示。

我国已建成大量各类水库,库岸崩滑事件也屡见不鲜,表 1.1 列出了部分库岸滑坡实例(王士天等,1997,在此基础上进行了补充)。其中值得注意的是 1961 年 3 月的柘溪水库塘岩光滑坡,它是我国第一个规模最大的岩质库岸滑坡,滑体位于该水库的库首区,距大坝约 1.55km, $1.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑体以 19.58 m/s 的速度,沿层间软弱带顺向($\angle 34^\circ \sim 35^\circ$)滑入水库,激起高达 21m 的涌浪,涌浪到达坝前仍高于坝顶 1.6m,致使库水翻坝下泄,淹没了下游施工基坑,冲毁了部分已建成的构筑物,造成巨大的经济损失,死亡 40 余人。



(a)建设中的瓦伊昂大坝



(b)滑坡后的瓦伊昂水库

图 1.1 瓦依昂水库滑坡

表 1.1 部分库岸滑坡破坏实例统计表

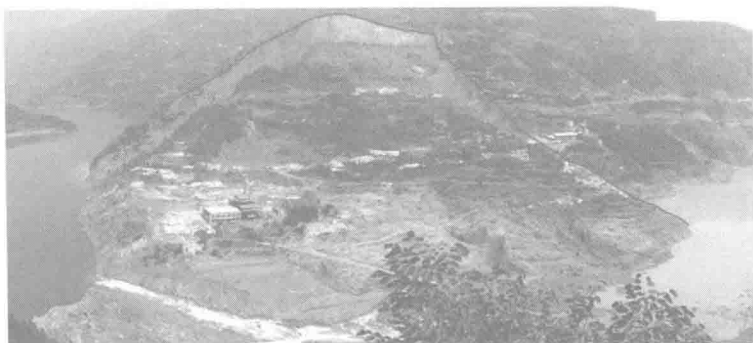
序号	名称	所在工程	破坏类型	变形破坏特点
1	官厅	官厅	坍岸	1955 年蓄水后, 库岸由黄土状土组成的地段产生坍岸, 宽度一般为 20~30m, 个别达 50~80m, 单宽坍岸量 300~700m ³ 。坍岸主要发生在蓄水初期, 1955~1956 年两年的坍岸宽度占 50%~80%, 1957 年后坍岸现象普遍减弱, 1960 年后库岸基本上趋于稳定

续表

序号	名称	所在工程	破坏类型	变形破坏特点
2	三门峡	三门峡	坍岸	1960年蓄水后,黄土状的库岸迅速发生坍岸,坍岸线总长达200km,占全部岸线的41.5%,近 $9000 \times 10^4 \text{ m}^3$,坍岸宽度一般为30~70m,最大达280m,单宽坍岸量一般为200~2000 m^3 ,最大达7000 m^3 。在蓄水初期及水位上升期坍岸强烈。水位上升的前五个月,坍岸量占70%~90%,1962年5月后,水库处于低水位运行,坍岸趋于稳定
3	苏州崖	刘家峡	顺层滑动	结晶片岩,倾向河床,倾角 $20^\circ \sim 40^\circ$,1952年即发现有平行岸坡的直立裂缝,且逐年加宽,1957年发生滑动,垂直落距10m,水平滑距5~8m,1968年水库蓄水,滑坡未动。滑坡总体积约60万 m^3
4	公牛石	黄龙滩	古滑坡复活	1974年蓄水。古滑坡体厚26m,体积(200~500)万 m^3 ,当水位升至高程219m时,高程240m以下出现坍塌
5	马头山	黄龙滩	堆积层滑动	1974年蓄水。两年后,当水位消落4.13m时,风化破碎基岩及上覆松散堆积物沿顺坡向基岩片理面急速滑落,体积为40万 m^3 ,涌浪高度16.18m
6	刺桐溪	凤滩	堆积层滑动	1976年蓄水,水位从120m升到160m时,坡脚1/3被淹,顶缘拉开。1977年暴雨后发生滑动。体积(16~19)万 m^3
7	龟石	龟石	顺层滑动	滑坡体为砂页岩互层,倾向河床,倾角 30° 。1960年蓄水,水位抬高20m后,风化页岩、砂岩顺层面滑动,体积为135万 m^3
8	塘岩光	柘溪	顺层滑动	细砂岩夹板岩,倾向河床,倾角 $34^\circ \sim 42^\circ$,板岩层间错动面上有黏土充填。1961年蓄水,18天后库水位上升约50m,连续8天降雨,岩体沿层面急速滑落,滑动体厚20~35m,总体积165万 m^3 ,涌浪达到对岸的浪高为21m,随后逐渐稳定
9	小黄崖	乌江渡	基岩拉裂	由巨层灰岩组成高达200m的陡崖,蓄水前在顶缘即出现裂缝。1979年蓄水,不到两年,水位上升100m左右,变形急剧增长,估计不稳定岩体体积(70~100)万 m^3
10	千将坪	三峡	顺层滑动	2003年,三峡库区蓄水到135m高程,滑坡堵江并形成高程达149~178m的坝体,总方量约2400万 m^3 ,激浪高近30m,诱发滑坡的主要因素是持续强降雨,雨水大量渗入,软化了岩石,增加了滑体的重力和渗透压力,降低了摩阻力,促使斜坡破坏,形成滑坡
11	高阳镇	三峡	顺层滑动	2008年,三峡库区出现持续暴雨天气,最高降雨量达106mm,引起特大滑坡和泥石流

2003年6月20号三峡水库蓄水至135m,2003年7月13日凌晨,长江支流青干河边的秭归县沙镇溪镇发生了千将坪滑坡,如图1.2所示。滑坡总方量约2400万 m^3 ,滑坡堵江并形成高差达149~178m的坝体,激浪高近30m,造成14人丧生、10人失踪、1200多人家园被毁,经济损失惨重。

从这些典型灾难性滑坡事件中不难发现,相比于其他环境中的滑坡失稳或工程边坡破坏,库岸滑坡灾害影响范围更加广泛,具有突发性强、破坏力大、分布面积广、救援难度大等特点,往往会造成严重的经济损失和重大人员伤亡。因此,库岸边坡的稳定对于水利水电工程的安全和有效运营以及库区人民的生命财



(a) 滑坡前



(b) 滑坡后

图 1.2 三峡库区千将坪滑坡

产安全、航道安全和社会稳定均有着极为重要的现实意义。

水-岩相互作用在自然界广泛存在,岩土边坡变形破坏过程中,常常有水的参与,水是诱发各种地质灾害最活跃、最主要的因素。已建水库中库岸崩滑的发育是比较普遍的,实际统计资料表明,库岸边坡失稳破坏发生在库水位上升期者占 40%~49%,发生在水位消落期者约占 30%,而一些大型滑动则往往发生在库水位达到最高峰后的急剧消落时刻(王士天等,1997)。

长江三峡水库是一个典型的河谷型水库,库区跨越渝东和鄂西地区,库区两岸城市、集镇分布密集。三峡工程竣工后,库水每年都将按“冬蓄夏洪”的调度计划在 145m 的防洪水位和 175m 的蓄水发电水位之间或缓慢或快速地升降,如表 1.2 所示。在约 600km 长的河道两岸形成高差为 30m 的消落带,范围涉及湖北省 4 个县和重庆市 22 个县(区)。

据不完全统计,三峡库区已经查出的滑坡约 5000 余处,其中涉水滑坡近 2000 处;体积大于 100 万 m^3 的重大涉水滑坡有 300 余处。自 2003 年三峡水库蓄水以来,开展了二期、三期、三峡后续规划等地质灾害专业监测治理,历经库