



中国地质调查成果
CGS 2015-015

三峡库区高陡岸坡 成灾机理研究

黄波林 刘广宁 王世昌 陈小婷 齐 信 著



科学出版社



中国地质调查“1212011014027”项目资助
国家自然科学基金委(面上)项目(41372321)资助

三峡库区高陡岸坡成灾机理研究

黄波林 刘广宁 王世昌 陈小婷 齐 信 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先系统总结了三峡库区各段高陡岸坡倾倒、滑移、剥落和倾倒转滑移等主要的变形破坏现象。基于茅草坡斜坡、龚家坊4#斜坡、箭穿洞危岩体、青石滑坡、横石溪危岩体5处典型高陡变形岸坡的详细调查和长期观测研究,提出三峡库区部分消落带岩体正在劣化,揭示库水波动加速了典型高陡岸坡的变形破坏。这些高陡岸坡失稳的主要致灾模式为涌浪,涌浪灾害影响范围更远更大。建立了三峡库区干流和支流崩滑体涌浪概化模型,开展了大量概化涌浪试验和龚家坊崩滑体缩尺试验,推导形成了刚性块体和散粒体的一系列滑坡涌浪公式,研究了涌浪的三维地貌效应。引入局部水头损失公式,初步建立了可计算全河道涌浪的公式法计算体系。针对崩塌落石和支流滑坡产生的涌浪问题,建立了N-S方程的流体-固体耦合涌浪分析方法。针对长距离、大范围的涌浪灾害问题,构建了基于波浪理论的滑坡涌浪数值计算方法。并利用滑坡涌浪案例进行了各方法的有效验证。

本书适合水利、工程地质和地质灾害的专业人员使用,也可作为相关专业研究生的专业读本。

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区高陡岸坡成灾机理研究/黄波林等著. —北京:科学出版社, 2015.7

ISBN 978-7-03-045128-6

I. ①三… II. ①黄… III. ①三峡-岸坡-灾害学-地质学 IV. ①P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第133716号

责任编辑:张井飞/责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年7月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:300 000

定价:156.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

滑坡涌浪一直对长江三峡的航道和城镇构成重大危害。1982年6月12日，位于西陵峡的新滩滑坡将千年古镇摧毁入江，形成了54m高的巨浪灾害。三峡水库蓄水后，滑坡涌浪灾害愈加突出。2008年三峡水库175m试验性蓄水伊始，位于巫峡的龚家坊崩滑入江，形成了13m高的涌浪，对长江航运和巫山县城带来了危害。

近十年来，黄波林博士坚持在三峡库区开展野外研究，提出了较为系统的峡谷区滑坡崩塌触发涌浪灾害的研究方法，在此基础上，形成了本专著。作者从三峡库区瞿塘峡、巫峡、西陵峡高陡岸坡及危岩的发育与分布规律入手，将岸坡失稳模式与涌浪分析方法进行结合，采用物理试验、数值模拟等手段，对高陡崩滑体形成的涌浪灾害进行了富有成效的研究。基于岸坡失稳模式和水体条件对三峡库区滑坡涌浪类型进行了分类，通过物理试验，推导了刚性块体和散粒体滑坡涌浪的计算公式，初步建立了可计算全河道涌浪的公式法。针对崩塌落石和支流浅水区滑坡产生复杂涌浪问题，构建了流体-固体耦合涌浪分析方法。作者还通过三峡库区龚家坊滑坡、千将坪滑坡涌浪案例，对这些方法进行了实证。

本书理论与实践相结合，不仅对三峡库区滑坡涌浪灾害的评价和风险管理起到了很好的支撑作用，相信也将推动我国峡谷区滑坡涌浪灾害的研究更上一层楼。我非常乐意为本书题序，希望作者持之以恒，取得更加丰硕的成果。

国际滑坡协会主席



2015年4月3日

前 言

三峡库区地质结构复杂,历来是地质灾害高发区域,尤其是高陡岸坡发育区域,失稳时运动速度快,涌浪致灾效应大,威胁范围广。2010年“三峡库区高陡岸坡成灾机理研究”项目启动,研究的主要内容之一就是滑坡涌浪灾害。项目团队通过团结协作,克服了种种困难,从开始的不知所措,到如今可以主动分析存在的问题和深挖问题的根源,可谓感慨万千,体会较多。

高陡岸坡成灾机理研究问题是一个很大的课题,也是三峡库区安全运营的关键地质问题之一。由于水平所限,本书仅对三峡库区典型库岸段成灾模式及重点崩滑体涌浪成灾案例进行了粗略分析。作者将这几年的成果进行系统梳理总结,形成于文,以期为该领域的研究贡献绵薄之力。

第1章至第2章梳理总结了西陵峡、巫峡、瞿塘峡三个峡谷段高陡岸坡发育及危岩体分布特征,重点分析了巫峡段岩质库岸的岸坡结构类型和变形破坏模式。

第3章至第4章以5个典型崩塌和滑坡为例,研究了库水位波动对高陡岸坡的影响;通过高陡岸坡失稳-涌浪致灾实例,划分涌浪类型。

第5章构建了滑坡涌浪应急监测方法,对龚家坊残留危岩体爆破清除产生的涌浪进行了现场监测和数据分析。

第6章至第7章分别采用概化涌浪物理试验和原型缩尺涌浪物理试验对概化的滑坡涌浪和龚家坊崩滑体产生的涌浪进行了深入研究,推导了系列涌浪计算公式。

第8章至第10章分别构建了涌浪计算公式法、流固耦合的N-S方程法和波浪理论方法对各类型滑坡涌浪进行了研究。

第11章至第12章主要对高陡岸坡成灾风险管理措施进行了分析,得出了结论和建议。

本专著成果是在以下项目的资助下完成的:中国地质调查项目“三峡库区高陡岸坡成灾机理研究”,国家自然科学基金委(面上)项目“基于水波动力学的水库崩塌滑坡涌浪研究”。全书第1章至第12章均由黄波林、刘广宁、王世昌、陈小婷执笔合力完成,文中部分图件由齐信所作。

项目执行过程中,始终得到了殷跃平研究员的指导和帮助。本书也是在中国地质调查局计划项目“西部复杂山体地质灾害成灾模式研究”的业务指导下完成的,因此感谢中国科学院地质力学所侯春堂研究员、吴树仁研究员、张永双研究

员、李滨博士、冯振博士、韩金良博士、王涛博士、闫金凯博士、张明博士后、孙萍副研究员的大力支持和指导。中国地质调查局文冬光研究员、张作辰研究员、李铁锋研究员、李晓春博士、石菊松博士多次赴野外检查指导工作，探讨岩质高陡岸坡失稳模式和涌浪研究等工作，在此致谢。刘传正研究员、许强教授、伍法权研究员、胡新丽教授、李文鹏教授、吴珍汉研究员、文宝萍教授、彭建兵教授、韦京莲教授、程伯禹教授、张茂省研究员、宋军教授、王洪德教授、高幼龙教授，重庆市国土房管局彭光泽处长、马飞处长、王磊处长，巫山国土房管局汪忠来局长、雷瑞新副局长、陈中富主任，国家海洋局第一海洋研究所孙永福研究员、青岛海洋地质研究所彭轩明研究员在多次的项目交流和学术交流沟通中给予了具体的建议和指导，在此表示衷心感谢。

项目执行过程中还得到了外协单位长江科学院水力学研究所韩继斌所长、姜治兵主任、任坤杰博士，长江科学院岩土力学研究所朱杰兵主任，长沙亿拓土木工程监测有限责任公司谢彩霞、张波工程师，珠江水利科学院王磊主任的大力支持和协助。他们为项目成果报告的最终完成做出了贡献。

武汉地质调查中心各相关部门及历届领导也给予了关心和支持，中心主任李金发主任、姚华舟主任、潘仲芳书记、张旺驰副主任、鄢道平副主任，人教处王国强处长，水环室黄长生处长，他们多次亲临野外一线检查指导工作。本项目若干工作在实施过程中同时也得到了雷天赐工程师、喻望高级工程师、霍志涛高级工程师、彭轲教授级高工、黎义勇工程师宝贵帮助，在此表示特别感谢。

在本书完成之际，作者尤其感谢陈立德教授，他带领项目组完成了前期立项论证工作，在项目后期的实施过程也提供了大力的支持和帮助！此外项目开展过程中，项目办金维群处长、总工办胡光明处长时常给项目组出谋划策，提供了大量宝贵建议和想法，项目组受益颇深，在此对他们的关心和帮助表示由衷感谢。

由于学术水平所限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 3 月于武汉

目 录

序

前言

第 1 章	三峡库区高陡岸坡发育及危岩体分布	1
1.1	西陵峡高陡岸坡结构及危岩体分布特征	3
1.2	巫峡高陡岸坡发育及分布特征	4
1.3	瞿塘峡高陡岸坡发育及分布特征	7
第 2 章	巫峡北岸高陡岸坡变形失稳模式分析	9
2.1	巫峡口-独龙库岸段	9
2.1.1	不稳定斜坡发育情况	9
2.1.2	巫峡口-独龙段变形模式	12
2.1.3	巫峡口-独龙段失稳模式	17
2.2	箭穿洞-孔明碑库岸段	21
2.2.1	高陡岸坡及危岩发育	21
2.2.2	箭穿洞-孔明碑库岸段失稳模式	23
2.3	其他高陡岸坡段	27
2.3.1	横石溪-燕窝岩库岸段	27
2.3.2	抱龙河-培石库岸段	32
2.4	小结	35
第 3 章	典型高陡岸坡及库水对其影响分析	38
3.1	库水波动对茅草坡斜坡的影响	38
3.1.1	茅草坡斜坡概况	38
3.1.2	相对位移监测设置	40
3.1.3	库水位波动影响	40
3.2	库水波动对龚家坊 4#斜坡的影响	43
3.2.1	龚家坊 4#斜坡概况	43
3.2.2	相对位移监测	45
3.2.3	库水位波动影响	46
3.3	库水波动对箭穿洞危岩体的影响	48
3.3.1	箭穿洞危岩体概况	48
3.3.2	库水波动对箭穿洞危岩体的影响	51

3.4	库水波动对青石滑坡的影响	53
3.4.1	青石滑坡概况	53
3.4.2	青石滑坡变形失稳模式	63
3.4.3	库水波动对青石滑坡的影响	65
3.5	库水对横石溪危岩体的影响	67
3.6	巫峡库岸段受库水影响程度分析	68
第4章	三峡库区高陡岸坡灾害效应分析	71
4.1	长江三峡高陡岸坡失稳造成的灾害案例	72
4.1.1	龚家坊崩塌灾害事件	72
4.1.2	新滩滑坡灾害事件	82
4.1.3	千将坪滑坡灾害事件	83
4.1.4	昭君大桥崩塌灾害事件	87
4.2	高陡岸坡成灾模式分析	88
4.3	高陡岸坡涌浪致灾的类型分析	90
第5章	龚家坊残留危岩体爆破涌浪现场监测	92
5.1	三峡库区龚家坊残留危岩体概况	92
5.2	龚家坊残留体涌浪简易监测方法	94
5.3	龚家坊残留体 2011 年 1 月 17 日爆破产生涌浪监测实例	95
5.4	涌浪监测数据分析	98
5.4.1	入水速度	98
5.4.2	部分水波波函数特征	100
第6章	崩塌滑坡涌浪概化物理模型试验研究	102
6.1	深水区涌浪物理模型入水试验	102
6.1.1	试验设计分析	102
6.1.2	试验结果分析	109
6.2	中等水深区涌浪物理模型入水试验	118
6.2.1	试验设计分析	119
6.2.2	试验结果分析	122
6.3	小结	129
第7章	崩塌滑坡涌浪原型物理相似试验研究	132
7.1	滑坡涌浪物理相似试验原理	132
7.2	龚家坊涌浪物理模型的建立	134
7.2.1	河道及崩塌体模型	134
7.2.2	试验测试系统	135
7.2.3	试验目的及试验组次方案	136

7.3	物理试验中龚家坊崩塌体入水速度估算	137
7.4	龚家坊涌浪过程规律研究	137
7.4.1	172.8m 水位涌浪试验结果与试验有效性验证	137
7.4.2	龚家坊涌浪作用过程分析	138
7.5	不同水位下产生涌浪的高度差异分析	143
7.6	小结	144
第 8 章	滑坡涌浪公式计算方法研究	149
8.1	滑速经验公式收集整理	149
8.2	公式体系中的涌浪计算公式收集与整理	150
8.3	公式体系计算结果	157
8.4	小结	161
第 9 章	基于 N-S 方程的崩塌滑坡涌浪形成研究	163
9.1	流体力学 N-S 方程简介	163
9.2	流固耦合崩塌涌浪研究——以剪刀峰崩塌为例	164
9.2.1	FLOW-3D 介绍及耦合模型建立	164
9.2.2	流固耦合运动结果分析	166
9.3	浅水顺层滑坡涌浪研究——以千将坪滑坡为例	169
9.3.1	千将坪滑坡涌浪模型建立	169
9.3.2	模型有效性验证	170
9.3.3	千将坪滑坡涌浪分析	172
9.4	小结	176
第 10 章	基于波浪理论的崩塌滑坡涌浪传播数值模拟研究	179
10.1	波浪理论概述及研究进展	179
10.2	FAST/GEO-WAVE 模型	182
10.2.1	崩滑体初始涌浪计算	182
10.2.2	传播及爬高计算	183
10.2.3	3S 技术的前后处理模块	184
10.3	龚家坊崩滑体涌浪分析与验证研究	185
10.4	箭穿洞、龚家坊 4# 斜坡、茅草坡涌浪预测	190
10.4.1	箭穿洞危岩体涌浪预测	190
10.4.2	龚家坊 4# 斜坡涌浪数值模拟分析	195
10.4.3	茅草坡涌浪数值模拟分析	204
10.5	小结	213
第 11 章	高陡岸坡成灾风险管理措施	215
11.1	应对高陡岸坡失稳的风险管理措施	215

11.2	应对高陡岸坡形成涌浪的风险管理措施.....	216
11.3	箭穿洞、龚家坊 4#斜坡、茅草坡涌浪风险预警分区	216
11.3.1	箭穿洞航道涌浪预警分区	217
11.3.2	龚家坊 4#斜坡涌浪预警分区	217
11.3.3	茅草坡斜坡涌浪预警分区	219
11.3.4	小结	221
第 12 章	结论与建议	223
12.1	结论.....	223
12.2	存在的问题及建议.....	224
参考文献		226

第 1 章 三峡库区高陡岸坡发育及危岩体分布

三峡库区库岸斜坡地形地貌特征有明显的差异性，可以清楚的划分为高陡峡谷区和平缓宽谷区。相对高差大于 500m 且平均坡角 $\geq 45^\circ$ 的岸坡段可归为“高陡岸坡”，有些岸坡上部陡立成崖、下部为缓坡呈阶梯状；有些岸坡上部陡崖、中部缓坡、下部陡崖、峻坡呈陡缓相间折线状，通常也将其归为“高陡岸坡”。奉节以西至江津库岸段为四川盆地东部，呈现侵蚀、剥蚀作用而形成的褶皱低山丘陵地貌。其地形地貌受构造控制，长江河谷地形以宽谷为主，库岸斜坡较缓，江面宽阔，最宽达 1000m 以上。奉节至宜昌出现高陡岸坡组成的峡谷区与平缓斜坡组成的宽谷区相间的地貌。总体上，三峡库区高陡岸坡较集中发育分布于西陵峡、巫峡、瞿塘峡三个峡谷中（图 1.1）。三个峡谷山高坡陡，居民聚集地少，很多岸线甚至无人居住。



图 1.1 三峡库区高陡岸坡重点分布区域

三峡水库峡谷段高差 300~1200m。河谷狭窄，岸坡陡峭，长江干流江面一般宽度 150~300m，最窄处仅 90 余米（蓄水前）。岸坡坡度多为 $35^\circ\sim 55^\circ$ ，局部达到 75° 以上。区内地势险峻，岩质岸坡地质灾害常有发生。历史上三峡峡谷区就是地质灾害的频发区域。据历史记载自公元 100 年至今，西陵峡已发生较大的滑坡岩崩 14 次，其中公元 1030 年和公元 1542 年链子崖岩崩规模最大，曾分别阻江碍航 21 年和 82 年。

从三峡卫星影像来看（图 1.2），三峡库区地质构造线与河流流向小角度相

交。当河谷切割硬岩（灰岩、石英砂岩）和构造线时，形成雄壮的峡谷。如河谷切割齐岳山背斜的二叠系、三叠系灰岩形成瞿塘峡。而当河谷与构造线平行或切割为非硬岩区时多形成宽谷。因此，三峡库区高陡岸坡的区域多发育于峡谷硬岩分布区附近。从高陡岸坡的集中发育区来看，主要分布于瞿塘峡夔门段、巫峡大宁河口-独龙段、巫峡望霞-建坪段、巫峡箭穿洞-剪刀峰段、巫峡曲尺滩段、巫峡铁官峡-火焰石段、西陵峡香溪河口-链子崖段、西陵峡九湾溪-庙河段；这些区域对应着齐岳山背斜核部、横石溪背斜、神女峰背斜和黄陵背斜西翼。



图 1.2 三峡库区遥感解译图（ETM 数据）

从高陡岸坡及危岩体的地层岩性来看，瞿塘峡峡谷段大面积出露三叠系下统的灰岩白云岩，二叠系的灰岩在齐岳山背斜核部附近出露；巫峡峡谷段大规模出露的地层除了三叠系的灰岩白云岩外，还有二叠系的灰岩硅质岩等硬岩；西陵峡大规模出露的地层则更多，香溪河口-链子崖段出露二叠、三叠系的灰岩、白云岩、石英砂岩，九湾溪附近则为奥陶系和寒武系的灰岩、白云岩；至下西陵峡地层为前寒武系的灰岩白云岩。因此总体上来看，从瞿塘峡到西陵峡形成高陡峡谷段的地层总体越来越老。

从岩性组合来看，高陡岸坡的组成可分为单一硬质岩体、软硬相间岩体、软基座上伏硬质岩体等类型。单一硬质岩体构成的斜坡多发育危险块体，其破坏多为材料性破坏。由于卸荷风化等因素造成裂隙或岩层相互交切形成块体，随着风化或雨水等营力作用下，裂隙面的强度降低而发生岩体破坏。软硬相间岩体和软基座上伏硬质岩体构成的斜坡则发育危岩群或大型崩滑体，其破坏类型多为结构性与材料性的混合破坏。由于软岩的风化剥蚀或受力压缩引起结构变形，进而引发硬岩的材料性破坏。当结构变形和硬岩材料破坏达到一定的程度不能相互协调后，就会发生大规模破坏。

1.1 西陵峡高陡岸坡结构及危岩体分布特征

三峡库区西陵峡高陡岸坡主要集中发育区间为香溪河口至九畹溪口（兵书宝剑峡）峡谷段（坐标范围：北纬 $30^{\circ}51'56'' \sim 30^{\circ}58'19''$ ，东经 $110^{\circ}44'40'' \sim 110^{\circ}52'34''$ ）。该库岸段长 13.5km，长江在该段河道走向为 NW-SE 向，库岸段内河谷狭窄，岸坡陡峭，属于中低山峡谷地貌。沿江 5km 范围内，长江两岸岸坡高差相差不大，北岸略高于南岸，北岸最高点高程约 1750m，位于新滩滑坡顶部广家崖危岩一带，相对高差约 1500m；南侧最高点高程约 1450m，位于九畹溪右岸一侧山脊上。两岸地貌上基本上呈沟脊相间与长江近垂直展布，总体走向 NNW，因长江切割而间断。受地貌影响该库岸段河面宽度不均，另外因三峡水库调水，河面宽度呈周期性变化，枯水期 145m 水位时，河面最宽处约 1200m，最窄处约 400m，蓄水期 175m 水位时，河面最宽处约 1450m，最窄处约 550m。两岸岸坡坡度多为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，局部达到 75° 以上，为斜向结构岸坡。

该库岸段位于黄陵背斜西翼，与秭归盆地东翼相接，地层呈单斜构造，其中上游段链子崖、白沱一带挟持 NNE 向仙女山和 NNW 向九畹溪两活动性断裂之间，构造裂隙发育。该库岸段岩层产状为 $270^{\circ} \sim 320^{\circ} \angle 25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，其主要受卸荷作用及大型结构面切割影响。地层岩性在该区域自下而上出露依次为：①志留系（ S_1 ）。主要有薄层、粉砂岩、泥质粉砂岩、页岩，薄—中层砂岩构成，风化强烈，强度较低，主要分布在广家崖危岩下侧新滩滑坡及对岸一带；②石炭系（ C_2 ）和泥盆系中下统（ D_{2+3} ）。主要由厚层石英砂岩、中厚层灰岩构成，间夹少量页岩、赤铁矿层，主要分布于链子崖、广家崖危岩局部区域；③二叠系（ Pd 、 Pw 、 Pm 、 Pq ）。该组主要由含燧石结核灰岩、煤层、炭质页岩构成，主要分布于链子崖、广家崖危岩局部区域；④三叠系嘉陵江组（ T_{1j} ）、大冶组（ T_{1d} ）和寒武系（ ϵ ）。主要由中厚层薄层灰岩、白云岩构成，间夹页岩，主要分布于兵书宝剑峡的白沱危岩至香溪河口库岸段。

通过对各个岸坡的详细调查，由于构造原因，西陵峡岸坡均为斜向横向山谷，西陵峡段有以下 4 种岩体结构类型与危岩体密切相关。①块裂状结构岩体，其特征为：厚层巨厚层岩体，发育几条大型结构面，裂隙结构面间距大于 1.5m，裂隙一般上部张开下部闭合，局部形成危险块体。该类型斜坡一般发育大型危岩体，如链子崖危岩体、广家崖危岩体。②碎裂结构岩体，其特征为：中薄层，风化卸荷裂隙发育，裂隙间距小于 0.5m，极发育的结构面一般有 2~3 组，小型的分离体较多。如梭子山危岩体、兵书宝剑峡一带小型孤石，其规模小、发生频率高，且预知性差，危害性较大。③上硬下软结构岩体，其特征为：上部岩体坚硬、强度高、整体性好，抗风化能力强，但下部软岩破坏强烈，坡顶

易形成大型纵向裂隙。易形成孤立危岩体，危岩体变形破坏均受下部的软岩控制，如问天筒危岩体。④单一层状结构岩体，其特征为岩体成层性较好，多为中薄层岩体，风化卸荷裂隙较多，有层间错动带，裂隙间距 0.5~1.5m，裂隙一般不越层，少量分离体，主要以顺向小型滑落为主，危害性较小，岸坡整体稳定性好，梭子山危岩体上游至香溪河口段多发育该类型结构岩体控制的危岩体。

西陵峡库岸段发育大小危岩体数十处，集中发育于黄陵背斜与秭归盆地交界处。数量上，长江左岸多于右岸。单体体积上，下游大于上游。其中较典型的有梭子山危岩体、白沱危岩体、链子崖危岩体、广家崖危岩体、问天筒危岩体、九畹溪口危岩体。具体分布状况见（图 1.3）。



图 1.3 西陵峡高陡岸坡发育及重要危岩体分布

1.2 巫峡高陡岸坡发育及分布特征

高陡岸坡及危岩体在三峡库区巫峡整个峡谷段局部库岸段广泛发育与分布（图 1.4），其中黄色框所示的为危岩群，其中 • 为危岩群内重要、典型危岩单体（坐标范围：北纬 31°00′15″~31°04′39″，东经 109°53′48″~110°21′42″）。该库岸段长 42km，巫峡上段河道呈弧形展布，河道走向近 NW-SE 向，中段河道走向 SWW-NEE，下段河道走向为 NWW-SEE。库岸段内河谷狭窄，岸坡陡峭，属于中低山峡谷地貌。该库岸段发育横石溪、神女溪、抱龙河、鳊鱼溪、链子溪几条

大的次级支流。沿江 5km 范围内, 长江两岸岸坡高差相差不大, 北岸最高点高程约 1800m, 位于巫峡上段登龙村一带, 相对高差约 1600m; 南侧最高点高程约 1450m, 位于巫峡下段链子溪一带。受地貌及河流切割影响该库岸段河面宽度不均, 另外因三峡水库调水, 河面宽度呈周期性变化, 枯水期 145m 水位时, 河面最宽处约 400m, 最窄处约 250m, 蓄水期 175m 水位时, 河面最宽处约 600m, 最窄处约 350m。两岸岸坡坡度多为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 局部达到 75° 以上。巫峡上段平均坡度北岸大于南岸, 岸坡结构类型为斜向、横向结构岸坡; 巫峡中、下段平均坡度南岸大于北岸, 南岸局部库岸段甚至形成陡崖, 北岸多以 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 峻坡为主, 岸坡结构类型为斜向、横向结构岸坡。



图 1.4 巫峡高陡岸坡发育及重要危岩体分布

构造上该库岸段自上而下主要由巫山向斜、横石溪背斜、神女溪-官渡口向斜构成。其在大的构造内发育数条次级褶皱, 如神女峰背斜、穿箭峡向斜为横石溪复式背斜内的次级褶; 青石背斜为神女溪-官渡口向斜与培石向斜之间的次级褶皱。巫峡段大量高陡岸坡、危岩体的发育、分布均受到这些次级褶皱影响。宏观上看, 巫峡上段地形地貌及高陡岸坡结构发育主要受巫山向斜、横石溪背斜所控制; 中段和下段岸坡结构主要是受到横石溪背斜、神女溪-官渡口向斜所控制。

危岩体的分布与区域地质构造紧密相关。背斜顶部受张力作用, 岩体结构疏松, 该构造区域卸荷作用强烈, 发育大量纵张卸荷裂隙, 这些大型裂隙大多成为危岩体的控制边界。同时, 背斜形成了 X 节理, 节理切割岩层也构成了众多危岩体的边界。

该区域地层自下而上出露依次为: ①志留系 (S_1), 主要由薄层、粉砂岩、泥质粉砂岩、页岩, 薄—中层砂岩构成, 风化强烈, 强度较低, 主要在横石溪背

斜核部向家湾一带出露；②石炭系（ C_2 ）和泥盆系中下统（ D_{2+3} ），主要由厚层石英砂岩、中厚层灰岩构成，间夹少量页岩、赤铁矿层，主要在横石溪危岩体、廖家坪危岩体区域局部出露；③二叠系（ Pd 、 Pw 、 Pm 、 Pq ），该组主要由含燧石结核灰岩、煤层、炭质页岩构成，主要在横石溪沟内及该背斜坡顶局部区域出露；④三叠系嘉陵江组（ T_{1j} ）、大冶组（ T_{1d} ），主要由中厚层薄层灰岩、白云岩构成，间夹页岩，在横石溪背斜两翼均有出露，是巫峡段出露最为广泛的地层。由于构造单元受到河流切割，岩层产状在该库岸段变化较大，局部库岸段岩层产状近水平状，局部库岸段岩层产状近直立。

通过对库岸段内高陡岸坡的详细调查，巫峡高陡岸坡结构、岩体结构类型有以下4种类型。①逆向、碎裂结构岸坡，其特征为：薄—中层反倾结构岸坡，发育大量垂直岸坡、切层节理、裂隙，同时发育大量风化卸荷裂隙，裂隙间距0.2~0.5m，裂隙逐步延伸、贯通，最终导致整体斜坡失稳，此类型以高陡岸坡为主，主要发育在巫峡口至独龙库岸段一系列潜在不稳定斜坡，其中龚家坊崩塌即为其中一典型实例；②横向、软硬互层结构岸坡，其特征为：上部岩体坚硬、强度高，抗风化能力强，卸荷作用强烈，坡顶易形成大型纵向裂隙，大型危岩体形成、破坏、失稳均受岩体中的软岩控制，此类型主要多发育为大型危岩体，如横石溪危岩体、望霞危岩体、廖家坪危岩体、猴子包危岩体，受基底软岩、煤层控制；③横向、层状（块状）结构岸坡，其特征为：厚层巨厚层岩体，岩层倾角较小，发育几条大型结构面，裂隙结构面间距大于1.5m，裂隙一般上部张开下部闭合，易形成大的危险块体，如箭穿洞危岩体、曲尺滩危岩带、黄岩窝危岩带，该类型危岩体一旦失稳将影响长江航道安全、造成涌浪灾害；④顺向、板裂结构岸坡，其特征为：薄—中层岩体顺向岸坡，层面发育大量共轭X节理，X节理沿与水平面一定夹角方向切割岩体，其发育呈羽状条带结构，X节理发育密度大（ >10 条/ m^2 ）、分布面积广、横向延伸长度较小、偶见大型出露、切割深度不均、形成危岩体积相对较小，但分布在高程大、坡度陡立岸坡的危岩体，一旦失稳由势能转化而来的能量不容忽视，如剪刀峰至孔明碑一带潜在的不稳定块体。

巫峡库岸段高陡岸坡、危岩体发育众多、分布广泛。危岩体的分布呈带状，特别是当地地貌条件、岸坡结构、岩体结构和岩性条件类似时，变形失稳模式相似的危岩体就会集中出现。巫峡口至独龙段以倾倒变形岸坡为主，横石溪背斜两岸泥岩基座上发育砂岩的危岩体，在望霞及建坪山顶发育以炭质泥岩或煤层为基座的灰岩、瘤状灰岩危岩体。神女峰山脚至孔明碑段一带发育顺层危险块体。巫峡中、下段烂泥湖至上坪沱库岸段高陡岸坡、危岩体主要集中发育在曲尺滩、黄岩窝、上坪沱一带区域，多为平缓厚层灰岩X节理形成的柱状危岩体，分布上长江南岸多于北岸。各危岩体、危岩带具体发育分布状况见（图1.4）。

1.3 瞿塘峡高陡岸坡发育及分布特征

高陡岸坡及危岩体在三峡库区瞿塘峡库岸段发育分布相对较少,主要发育两处危岩带,以吊嘴危岩体为主的南岸危岩带和以风箱峡危岩体为主的北岸危岩带,具体分布见图 1.5,其中黄色框所示的为危岩群,其中●为危岩群内重要、典型危岩单体(坐标范围:北纬 $30^{\circ}59'56''\sim 31^{\circ}03'01''$,东经 $109^{\circ}33'46''\sim 109^{\circ}38'09''$)。该库岸段西起奉节县的白帝城,东至巫山县的大溪镇,长 8km,巫峡上段河道呈弧形展布,河道走向近 NW-SE 向,长江南岸为凸岸,北岸为凹岸。库岸段内河谷狭窄,岸坡陡峭,属于中低山峡谷地貌。两岸发育有 NE-SW 向季节性冲沟,切割较深,呈“V”形。沿江 5km 范围内,长江两岸岸坡高差相差不大,基本呈对称分布,南岸最高峰位于乌云顶,高程 1414.5m,北岸最高峰位于火焰山,高程 1393.9m,两点同处童家槽—土地湾 NE-SW 向背斜核部山脊顶部,因长江切割而间断。受地貌及河流切割影响该库岸段河面宽度不均,另外因三峡水库调水,河面宽度呈周期性变化,枯水期 145m 水位时,河面最宽处约 600m,最窄处约 300m,蓄水期 175m 水位时,河面最宽处约 750m,最窄处约 400m。最宽两处分别为北黑石 N500m 和南黑石 S520m,最窄处位于风箱峡七道门处,两岸岸坡坡度多为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,其中吊嘴危岩、风箱峡危岩处岸坡呈直立陡崖状,为横向结构岸坡。



图 1.5 瞿塘峡高陡岸坡发育及重要危岩体分布

构造上该库岸段以东为八面山台褶带构造单元,以西为四川台坳带。瞿塘峡位于大巴山台缘坳褶带内。瞿塘峡一带地质构造比较简单,主要发育齐耀山背斜