

# 三峡库区滑坡预测理论与方法

易 武 孟召平 易庆林 著

*Theory and Method of Landslide  
Stability Prediction in the Three Gorges Reservoir Area*



科学出版社

湖北省“楚天学者计划”特聘教授岗位资助

# 三峡库区滑坡预测理论与方法

**Theory and Method of Landslide Stability  
Prediction in the Three Gorges Reservoir Area**

易 武 孟召平 易庆林 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

滑坡预测与评价是滑坡灾害防治的重要基础和依据。本书针对三峡库区滑坡预测与评价问题,采用工程地质学、水文地质学和岩土力学等多学科理论,通过现场监测、实验研究、理论分析和数值模拟分析等方法,从三峡库区环境工程地质条件分析入手,系统地研究了三峡库区滑坡地质特征及其影响因素,库水作用下滑坡稳定性的动态响应机制,滑坡预测预报模型、方法和滑坡前兆信息的监测,以及滑坡控制机理及防治等内容。剖析了库区典型滑坡与库水位变化之间相关关系和地质特征,建立了库水位变化下滑坡稳定性动态响应模式,揭示了库水作用下滑坡变形破坏规律;总结了三峡库区滑坡预测预报模型与方法,提出了水库水位作用下滑坡稳定性计算工况和计算公式,对三峡库区典型滑坡进行了评价与预测。同时,本书还系统介绍了目前三峡库区滑坡监测的主要方法,并基于现场监测资料,对库区典型滑坡变形进行了监测与评价;分析了水对岩石力学性质及滑坡稳定性的影响,揭示了库区滑坡控制机理,并针对三峡库区实际情况提出了相应的防治措施,为三峡库区滑坡灾害的预测与防治提供了可靠的理论和方法。

本书可供从事地质工程、岩土工程、地质灾害预防与治理的科技人员,以及地质、土木、水电及环境地质等专业的师生参考和使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

三峡库区滑坡预测理论与方法/易武,孟召平,易庆林著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030557-2

I. ①三… II. ①易… ②孟… ③易… III. ①三峡工程-滑坡-预测-研究 IV. ①P642.22②TV632.719

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 043341 号

责任编辑:贾瑞娜/责任校对:邹慧卿  
责任印制:张克忠/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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张:14

印数:1—2 000

字数:280 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

长江是世界著名的大河之一,也是我国最长的一条内河航道。由于它在我国经济、政治和文化生活中的重要地位,被称为“黄金水道”,在其上游长江三峡工程库区地质结构复杂和岩体变形较为强烈,地势险峻,河谷切割严重,崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害极为发育,历来是我国地质灾害多发区和重灾区之一,给长江航运和沿岸居民带来严重灾害。

经过 14 年建设、2 年的 175m 试验性蓄水观测,2010 年 10 月 26 日 9 时,举世瞩目的长江三峡大坝终于将坝前水位蓄至 175m。随着三峡水库的蓄水和投入正常运行,三峡工程的防洪、发电、航运等效益已经凸显,但由于水库运行期水库水位涨落将使库岸环境发生很大的变化,必将引起库岸滑坡的失稳,具体表现在水库老滑坡的复活和新滑坡的产生。据 2009 年 7 月湖北省、重庆市库区 26 个县(市、区)政府上报统计资料及国土资源部调查,在新界定的三峡库区范围(生态屏障区和移民迁建区)内查出崩塌、滑坡共 5300 余处,总体积  $8.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。因此开展三峡库区滑坡预测研究,有效遏制库区地质灾害事故的发生,保障三峡库区的安全,是三峡水库蓄水和投入正常运行需要解决的问题。

国家在“七五”期间,将“三峡工程地质与地震问题”列入重点研究课题。课题包括坝区及外围地壳稳定性、坝区岩体力学及工程地质问题、水库诱发地震危险性评价与预测、库岸稳定性和三峡工程环境地质评价与预测 5 个研究专题。进入 20 世纪 90 年代,随着三峡工程建设的不断深入,在库区出现了大量的复杂边坡工程问题,对三峡库区滑坡稳定性进行了大量的研究。1992 年,国家将“三峡工程地质与地震及长江开发重点地段环境地质问题研究”列入“八五”国家科技攻关项目。2001 年,随着三峡工程建设的蓄水影响,库区地质灾害问题凸显,国家先后分 3 期共投入 100 多亿元对三峡库区地质灾害进行研究和整治,取得了一定的创新成果,提高了滑坡勘察、设计、施工、监测预警和信息化研究的科技水平。

作者有幸参加了三峡工程建设,从 1989 年以来,一直在长江三峡库区从事地质灾害勘察、崩塌滑坡监测、预报技术服务和科研工作。先后参加完成了“八五”国家科技攻关项目“三峡工程地质与地震及长江开发重点地段环境地质问题研究”子题“长江三峡工程库区重大危险性崩塌、滑坡监测方法与预报研究”、国务院专项“长江三峡链子崖危岩体防治可行性研究”项目、国家自然科学基金项目“基于 GIS 的滑坡稳定治理研究”;主持承担湖北省自然科学基金项目“三峡库区典型滑坡灾害监测分析与预警判据研究”和“三峡库区典型区域滑坡灾害 GIS 可视化分析系统”;主持国土资源部专项“三峡库区三期地质灾害防治监测预警工程滑坡预报模型和预报判据建立”子题“69 处地质模型的建立”和“三峡库区秭归县、兴山县二期、三期 48 处崩塌



滑坡地质灾害防治专业监测预警工程”等。同时,还主持完成湖北省三峡库区兴山县滑沙坝沟滑坡防治工程勘察项目、三峡库区地质灾害应急防治工程兴山县建阳坪库岸防治工程地质勘察和初步设计项目、三峡库区地质灾害应急抢险防治工程兴山县甘家坡滑坡工程地质勘察和初步设计项目,以及湖北省三峡库区兴山县杨家坪滑坡防治工程地质勘察等多个生产项目工作。特别是主持的国土资源部专项“三峡库区秭归县、兴山县二期、三期 48 处崩塌滑坡地质灾害防治监测预警工程”项目,在课题研究过程中发现库水对滑坡稳定性影响的重要性。2003 年 9 月作者在中国矿业大学(北京)资源与地球科学系攻读地质工程专业博士学位,针对三峡库区存在的滑坡预测与评价关键科学问题,开展了“三峡库区水位变化对滑坡稳定性的影响及其预测”博士学位论文研究,导师是孟召平教授,2008 年 5 月进行博士学位论文答辩,本书是在作者博士学位论文研究的基础上进行整理,并进一步扩展和深入的成果。

本书共 7 章。第 1 章绪论;第 2 章三峡库区环境工程地质条件;第 3 章三峡库区滑坡地质特征及其影响因素;第 4 章库水作用下滑坡稳定性的动态响应机制;第 5 章三峡库区滑坡预测预报模型与方法;第 6 章三峡库区滑坡监测方法研究;第 7 章三峡库区滑坡控制机理及防治研究。全书由易武博士、孟召平教授和易庆林教授级高工共同完成,其中第 1 章和第 7 章由孟召平教授撰写;第 2 章、第 3 章和第 5 章由易武博士撰写,第 4 章由易武博士和孟召平教授共同撰写;第 6 章由易庆林教授级高工和易武博士共同撰写。全书由易武博士和孟召平教授统稿。

本书的研究工作始终得到了三峡库区地质灾害防治工作指挥部指挥长黄学斌教授、总工徐开祥教授、监测室主任程温鸣教授,三峡大学田斌教授、张国栋教授、彭惠明教授、王尚庆教授、罗先启教授等的关心和帮助,北京工业大学姚爱军教授对本书的研究工作和撰写提供了许多宝贵的资料并提出意见,在此表示诚挚的谢意!

在课题的研究中还得到了苏欢老师、王振勉工程师、冯强老师、卢书强博士、尚敏博士、黄海峰博士、曾怀恩博士和硕士研究生饶新平、赵欣、张金团、兰华、陈书生、金志伟等的帮助和支持。在此特表谢意!同时,还要感谢书中的引用文献作者的支持和帮助。

本书的出版得到了湖北省“楚天学者计划”三峡大学地质工程专业特聘教授岗位的资助,同时,也得到三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室、湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站的资助,在此表示衷心的感谢。最后,我还要感谢中国矿业大学(北京)资源与地球科学系对我的培养和教育,使我在研究理论和方法上得到了进一步提高和发展。

水库滑坡的稳定性和预测预报是库区地质灾害防治的重要问题,本书仅是对过去的一些研究成果进行了综合分析和经验总结,有很多理论和实践问题仍有待深入探讨和揭示,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年 1 月

# 目 录

## 前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 滑坡稳定性研究的目的与意义 .....      | 1  |
| 1.2 滑坡稳定性研究现状 .....          | 3  |
| 1.2.1 滑坡稳定性研究 .....          | 3  |
| 1.2.2 滑坡评价与预测研究 .....        | 5  |
| 1.2.3 三峡库区滑坡研究历史概况 .....     | 8  |
| 1.3 本书的研究内容与方法 .....         | 10 |
| 参考文献 .....                   | 13 |
| 第 2 章 三峡库区环境工程地质条件 .....     | 16 |
| 2.1 引言 .....                 | 16 |
| 2.2 三峡工程概况 .....             | 16 |
| 2.2.1 三峡工程 .....             | 16 |
| 2.2.2 三峡库区范围及移民 .....        | 17 |
| 2.2.3 三峡工程施工期蓄水情况 .....      | 18 |
| 2.2.4 三峡水库水位变化情况 .....       | 18 |
| 2.3 三峡库区地质特征 .....           | 21 |
| 2.3.1 库区气象 .....             | 21 |
| 2.3.2 地形地貌 .....             | 23 |
| 2.3.3 地层及岩性 .....            | 24 |
| 2.3.4 地质构造 .....             | 27 |
| 2.3.5 新构造活动特征及地震 .....       | 29 |
| 2.4 库区水文与工程地质条件 .....        | 33 |
| 2.4.1 库区地下水类型 .....          | 33 |
| 2.4.2 库区工程地质条件分区 .....       | 37 |
| 参考文献 .....                   | 38 |
| 第 3 章 三峡库区滑坡地质特征及其影响因素 ..... | 39 |
| 3.1 引言 .....                 | 39 |
| 3.2 三峡库区滑坡地质特征 .....         | 39 |
| 3.2.1 三峡库区滑坡分布特征 .....       | 39 |

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 3.2.2      | 三峡库区典型滑坡特征 .....               | 42         |
| 3.3        | 影响库区滑坡稳定性的因素 .....             | 51         |
| 3.3.1      | 地形、地貌对崩塌、滑坡发育的控制 .....         | 52         |
| 3.3.2      | 地层岩性对滑坡稳定性的控制 .....            | 52         |
| 3.3.3      | 地质构造对滑坡稳定性控制 .....             | 54         |
| 3.3.4      | 滑坡与岸坡结构的关系 .....               | 55         |
| 3.3.5      | 水对库区滑坡稳定性的影响 .....             | 55         |
| 3.3.6      | 地震和人类工程活动的影响 .....             | 56         |
| 3.4        | 三峡库区滑坡分类 .....                 | 58         |
| 3.4.1      | 概述 .....                       | 58         |
| 3.4.2      | 三峡库区涉水滑坡分类原则 .....             | 61         |
| 3.4.3      | 三峡库区涉水滑坡分类 .....               | 62         |
|            | 参考文献 .....                     | 64         |
| <b>第4章</b> | <b>库水作用下滑坡稳定性的动态响应机制 .....</b> | <b>65</b>  |
| 4.1        | 引言 .....                       | 65         |
| 4.2        | 三峡库区滑坡动态响应模式及特征 .....          | 67         |
| 4.2.1      | 库水位变化条件下滑坡动态响应模式及其稳定性 .....    | 67         |
| 4.2.2      | 典型滑坡实例分析 .....                 | 72         |
| 4.2.3      | 库水作用下滑坡稳定性计算工况 .....           | 82         |
| 4.3        | 滑坡稳定性动态响应的数值模拟分析 .....         | 86         |
| 4.3.1      | GEO-SLOPE 的 SEEP/W 软件特点 .....  | 86         |
| 4.3.2      | 计算模型 .....                     | 87         |
| 4.3.3      | 计算结果分析 .....                   | 89         |
| 4.4        | 库水作用下滑坡稳定性及其受控机制 .....         | 92         |
| 4.4.1      | 天然状态和不同库水位下滑坡稳定性数值模拟分析 .....   | 92         |
| 4.4.2      | 不同库水位下滑坡稳定性极限平衡法分析 .....       | 103        |
|            | 参考文献 .....                     | 106        |
| <b>第5章</b> | <b>三峡库区滑坡预测预报模型与方法 .....</b>   | <b>107</b> |
| 5.1        | 引言 .....                       | 107        |
| 5.2        | 岩石的蠕变特性及其模型 .....              | 107        |
| 5.2.1      | 岩石蠕变阶段及其特性 .....               | 108        |
| 5.2.2      | 岩石蠕变模型 .....                   | 110        |
| 5.3        | 滑坡变形发育阶段及特征 .....              | 111        |
| 5.3.1      | 三峡库区滑坡变形类型及其特征 .....           | 112        |
| 5.3.2      | 滑坡变形阶段判别 .....                 | 116        |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 5.3.3 | 滑坡失稳关键区域确定 .....          | 122 |
| 5.3.4 | 滑坡预警及其级别的确定 .....         | 123 |
| 5.4   | 三峡库区典型滑坡变形实例分析 .....      | 126 |
| 5.4.1 | 新滩滑坡变形 .....              | 126 |
| 5.4.2 | 马家坝滑坡变形 .....             | 128 |
| 5.4.3 | 宝塔滑坡变形 .....              | 130 |
| 5.5   | 岩质滑坡声发射试验及滑坡预报判据研究 .....  | 131 |
| 5.5.1 | 长江三峡链子崖危岩体岩石声发射室内试验 ..... | 132 |
| 5.5.2 | 黄茨大滑坡声发射监测 .....          | 132 |
| 5.5.3 | 岩质滑坡声发射预报判据和滑坡预报 .....    | 134 |
| 5.6   | 滑坡预测预报理论模型与方法 .....       | 135 |
| 5.6.1 | 概述 .....                  | 135 |
| 5.6.2 | 滑坡短期临滑预报模型 .....          | 137 |
| 5.6.3 | 中长期预测模型 .....             | 141 |
|       | 参考文献 .....                | 144 |
| 第6章   | 三峡库区滑坡监测方法研究 .....        | 146 |
| 6.1   | 引言 .....                  | 146 |
| 6.2   | 三峡库区滑坡常用监测方法与仪器 .....     | 147 |
| 6.2.1 | GPS地表位移监测 .....           | 149 |
| 6.2.2 | 全站仪地表位移监测 .....           | 150 |
| 6.2.3 | 钻孔倾斜监测 .....              | 151 |
| 6.2.4 | 地下水位监测 .....              | 152 |
| 6.2.5 | 降雨量观测 .....               | 152 |
| 6.2.6 | 宏观地质巡查监测 .....            | 153 |
| 6.2.7 | 其他监测新方法 .....             | 153 |
| 6.3   | 三峡库区滑坡监测系统 .....          | 156 |
| 6.3.1 | 三峡库区滑坡监测系统设计的一般原则 .....   | 157 |
| 6.3.2 | 三峡库区滑坡监测系统建设 .....        | 157 |
| 6.3.3 | 滑坡监测系统优化 .....            | 160 |
| 6.3.4 | 滑坡应急监测 .....              | 163 |
| 6.4   | 典型滑坡监测实例 .....            | 164 |
| 6.4.1 | 实例一:链子崖危岩体监测 .....        | 165 |
| 6.4.2 | 实例二:白水河滑坡监测预警 .....       | 170 |
| 6.4.3 | 实例三:树坪滑坡自动监测 .....        | 177 |
|       | 参考文献 .....                | 184 |



---

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 第 7 章 | 三峡库区滑坡控制机理及防治研究    | 185 |
| 7.1   | 引言                 | 185 |
| 7.2   | 水对岩石力学性质影响         | 185 |
| 7.2.1 | 含水量对岩石变形与强度的影响     | 185 |
| 7.2.2 | 不同含水量下的变形破坏机制      | 187 |
| 7.3   | 孔隙静、动水压力对滑坡稳定性影响   | 189 |
| 7.3.1 | 有效应力及其对岩石(体)力学参数影响 | 189 |
| 7.3.2 | 孔隙静、动水压力对滑坡稳定性影响   | 191 |
| 7.4   | 地下水、库水与降雨对滑坡的作用机理  | 194 |
| 7.4.1 | 地下水                | 194 |
| 7.4.2 | 库水                 | 196 |
| 7.4.3 | 降雨                 | 197 |
| 7.5   | 三峡库区滑坡防治工程         | 200 |
| 7.5.1 | 崩塌滑坡治理的主要工程措施      | 200 |
| 7.5.2 | 滑坡工程治理实例           | 205 |
|       | 参考文献               | 216 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 滑坡稳定性研究的目的与意义

斜坡岩土体在重力和其他内外地质营力作用下沿着贯通的剪切破坏面所发生的滑移现象,称为滑坡。滑坡的产生机制是某一滑移面上剪应力超过了该面的抗剪强度所致。滑坡是地壳表层岩、土体的一种动力地质灾变现象,是一种多发性的地质灾害<sup>[1]</sup>。滑坡在全球范围内广泛分布,危害极为严重。它不仅给人类生命安全带来了威胁,而且对环境、资源等均具有破坏性。

长江是世界著名的大河之一,也是我国最长的一条内河航道。由于它在我国经济、政治和文化生活中的重要地位,被称为“黄金水道”,在其上游长江三峡工程库区地质结构复杂和岩体变形较为强烈,地势险峻,河谷切割严重,崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害极为发育,历来是我国地质灾害多发区和重灾区之一,给长江航运和沿岸居民带来严重灾害。据 2009 年 7 月湖北省、重庆市库区 26 个县(市、区)政府上报统计资料及国土资源部调查,在新界定的三峡库区范围(生态屏障区和移民迁建区)内查出崩塌、滑坡共 5300 余处,总体积  $8.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,其中涉水崩塌滑坡 1945 处,不涉水崩塌滑坡 3441 处,主要分布在涪陵以下长江干、支流。调查表明,长约 5300km 的三峡库区岸原计划于 2008 年底蓄至 175m 最终水位,但最终蓄水至 172.5m 后停止,仅在此期间,库区就发生形变或地质灾害灾(险)情 132 起;崩滑体总体积约  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,塌岸 97 段长约 3.3km;紧急转移群众近 2000 人。2001 年 7 月 17 日,朱镕基总理在三峡工程移民暨对口支援工作会议上强调指出“三峡工程是一个整体,防治地质灾害和生态环境建设,是三峡工程密不可分的组成部分”。“加强对崩滑体等地质灾害的监测和治理,是关系到库区人民生命财产安全和子孙后代的大事,刻不容缓,必须在水库蓄水前抓紧治理。特别是对那些在蓄水后可能产生滑坡的崩滑体,要集中力量,抢先治理”。“对治理工程项目,要快调查、快规划、快立项、快审批、快实施,做到科学论证、简化程序、加快进行。”

国内外知名的秭归县新滩滑坡,历史上曾经有过多次复活滑动,1026 年和 1542 年,秭归新滩两次滑入长江,曾分别中断长江航运长达 25 年和 8 年。1985 年 6 月 12 日凌晨,再次发生滑坡,体积为  $3 \times 10^7 \text{ m}^3$  的滑坡体高速下滑,入江方量  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,产生最高涌浪 39m,因成功预报,滑坡体上居民全部撤离,但仍造成 1569 间房屋、780 亩农田及上、下游江段内 77 艘船只被毁,致死 12 人,长江断航

一周,造成经济损失1亿多元。1982年7月17日至18日,重庆市云阳县城东长江左(北)岸的鸡扒子发生滑坡,滑坡体面积近 $1\text{km}^2$ ,总土石方量达 $1.8\times 10^7\text{m}^3$ ,毁坏房屋1730间,工农业生产直接经济损失600万元。更为严重的是,由于大量土石滑入长江,河床堆高逾30m,造成约数千万元的经济损失,航道整治费高达8000万元。1987年9月1日,长江支流(大宁河上游)岸边巫溪县南门湾崩塌,7000 $\text{m}^3$ 块石摧毁崖下一旅店,造成致死122人的特大灾害。重庆马牛镇滑坡发生在1998年8月的暴雨季节。该滑坡面积为 $2.5\text{km}^2$ ,滑坡体方量达 $1\times 10^8\text{m}^3$ ,滑坡前有人户161户,造成161户居民无家可归,造成直接经济损失几千万元。1998年6~8月,在湖北省巴东县相继发生了白岩沟滑坡、铜盆溪岩崩、鲁家湾滑坡等。1999年8~9月,在巫山旧城发生了沿江滑坡和地面变形,造成3000多人受灾<sup>[2]</sup>。随着三峡水库的蓄水和投入正常运行,三峡工程的防洪、发电、航运等效益已经凸显,但由于水库运行期水库水位涨落将使库岸环境发生很大的改变,必将引起库岸滑坡的失稳,具体表现在水库老滑坡的复活和新滑坡的产生。例如,2001年5月1日发生的重庆市武隆滑坡,79人遇难;2004年6月5日,重庆市万盛区发生山体垮塌,造成11人死亡,10人失踪,3人受伤;2003年7月13日,三峡水库135m蓄水时在三峡库区湖北省秭归县沙镇溪发生的千将坪滑坡,滑坡体的体积为 $2\times 10^7\text{m}^3$ ,滑坡造成24人死亡和1200多人无家可归<sup>[3]</sup>。由于在三峡水库2003年6月1日蓄水前,人们对千将坪滑坡认识的不足,并未采取及时有效的防治措施,导致该滑坡失稳后的重大灾害发生。

国外因水库蓄水一放水引起水库岸坡失稳的实例也非常多见<sup>[4]</sup>。例如,意大利瓦依昂水库建成蓄水后,1963年10月发生了方量约 $2.7\times 10^8\text{m}^3$ 的滑坡,造成2000余人死亡及工程失效<sup>[7]</sup>;巴拿马运河1913年10月10日开始放水,不久E. Cucaracha滑坡开始复活,从1914年8月15日开始通航后,两年内E. Cul-ebra滑坡(1914年10月14日)、W. Culebra滑坡(1915年9月12日)和E. Cucaracha滑坡(1916年8月30日)相继复活,运河被迫三度关闭,时间长达8个月,恢复运河运营的清方量达 $1.53\times 10^7\text{m}^3$ ;美国Columbia河上的Grand Coulee水库1941年建成蓄水后,在12年内先后发生滑坡500起,其中约半数(245起)发生在蓄水后两年内<sup>[5~8]</sup>;Riemer统计了60个水库滑坡实例,指出85%的滑坡发生在建设或蓄水期,或工程完工两年内<sup>[9]</sup>。在日本,大约60%的水库滑坡发生在库水位骤降时期,40%发生在水位上升时期,包括水库蓄水初期。由此可见,水库水位的变化对库区范围内的滑坡稳定性影响是巨大的。因此开展三峡库区滑坡预测研究,有效遏制库区地质灾害事故的发生,保障三峡库区的安全,是目前三峡水库的蓄水和投入正常运行中需要解决的问题,对其研究具有主要的理论和实际意义。

## 1.2 滑坡稳定性研究现状

### 1.2.1 滑坡稳定性研究

人们对滑坡的认识是从19世纪后期阿尔卑斯山区开始的,至今,滑坡研究已有百余年的历史。然而进行系统研究还始于近半个世纪。1958年美国公路局滑坡委员会组织编写了《滑坡与工程实践》(Landslides and Engineering Practice)一书,随后在1978年又出版了《滑坡分析与防治》。1968年,在举行国际地质大会期间,成立了国际工程地质协会(IAEG),同时成立了“滑坡及其他块体运动委员会”,它是世界上第一个专门研究滑坡及其防治的国际组织。该委员会除每年向国际工程地质协会提出工作报告以外,还向联合国科教文组织(UNESCO)提交全球灾害性滑坡年度报告。1969年,美国土地保护部(Conservation Department)提出,由该部的矿山地质处执行,首先对加州的地震、滑坡等10种自然灾害进行了风险评估。1989年,由美国国家科学院的全国研究理事会(NRC)及联邦所属科学和减灾机构召集,由17位成员组成的国家委员会分工协作,制定了减灾10年计划。该计划把包括滑坡在内的自然灾害评估列为研究的重要内容。1977年加拿大矿物与能源中心(CANMET)编写了《边坡工程手册》(Pit Slope Manual),共27册,它从理论和实践两方面系统地对边坡工程进行了论述。1991年,联合国国际减灾10年(1DND)科技委员会提出了《国际减轻自然灾害10年的灾害预防、减少、减轻和环境保护纲要方案与目标》(PREEMPT),在规划的3项时事中的第一项就是进行灾害评估”,提出“各个国家对自然灾害进行评估”。国际减灾活动得到许多国家的积极响应,使灾害研究空前发展。滑坡是一种多发性的地质灾害,在全球范围内广泛分布,危害极为严重,受到国内外学者的普遍关注。国际岩石力学与工程学会、国际工程地质协会均将边坡工程作为一个重要的课题进行学术交流和专门研究<sup>[62]</sup>。

国内的滑坡研究起始于新中国成立之后,随着大规模经济建设的发展,研究工作日益广泛深入。20世纪70年代铁道部成立了“滑坡分类与分布”专题研究组,对全国铁路沿线进行普查。“六五”期间,地质矿产部将“中国西南、西北崩滑灾害与山区斜坡稳定性研究”列为专题进行重点攻关。“七五”期间,三峡工程地质地震专题组对三峡库区沿岸重点滑坡进行了登记和调查。“八五”期间,水利水电部的“岩质高边坡稳定及处理技术”被列为国家重点攻关项目,在统一规划下进行了卓有成效的工作。进入90年代,随着三峡工程建设的不断深入,在库区出现了大量的复杂边坡工程问题,对三峡库区滑坡稳定性进行了大量的研究。

滑坡稳定性分析和评价是边坡研究的核心。随着人类工程活动的发展和边坡研究理论的深入,分析手段不断拓宽,目前国内外边坡稳定性分析的方法很多,不同

的边坡类型可采取不同的力学模型和方法,不同的分析目的也有不同的方法与之相适应。目前,斜坡稳定性评价方法有多种,常用的有自然历史分析法、力学计算法、数值模拟法和工程地质类比法等。大体上属定性评价和定量评价两大类。定性分析方法主要有自然历史分析法、工程地质类比法、动态观测分析法等;定性分析方法的优点在于能够从宏观上把握滑坡目前的稳定状态、蓄水后可能的稳定状态及滑坡可能发生失稳的机理。定量分析方法有极限平衡理论、弹塑性力学理论和数值模拟计算等方法,在工程地质领域常用的分析方法主要还是极限平衡分析法和应力应变分析法等,其中,极限平衡分析法作为最基本、最简单的方法在边坡工程中得到广泛应用,其分析结果通常作为设计依据。弹塑性力学理论分析法除具有评价工程边坡的天然稳定性外,更具有了解各类工程治理加固措施有效性的作用,人们可以从多种途径来对边坡的稳定性进行评价。在实际工程中,传统的边坡稳态评价方法以稳定系数作为评价边坡工程稳定性的指标,如 Bishop 法、Janbu 法、Sarma 法等,它们计算结果的准确性取决于假设的计算模型与实际工程模型的吻合程度及计算参数的可靠性。然而,在工程实践中也存在设计安全系数  $F_s > 1.2$  或者更高的边坡工程失稳破坏现象,最根本的原因就是忽视了边坡工程中不确定性因素的影响,因此,关于边坡可靠性的分析,对于正确评价复杂边坡的稳定性至关重要,目前受到国内外学者的普遍关注。

对于边坡稳定性分析的理论主要是借鉴土力学和岩石(体)力学的研究成果,早期人们将简单均质弹性、弹塑性理论为基础的半经验半理论边坡分析方法用于岩质边坡的稳定性研究,但其计算结果与工程实际有较大差异。在 20 世纪 60 年代初,随着世界经济的发展,采矿、水利、交通和建筑等行业大量工程的建设,出现了许多地质条件极其复杂的大规模矿山边坡、大坝坝肩槽和库岸边坡、铁路和公路的路堑边坡问题,特别是 1959 年法国 Malpasset 坝左岸坝肩岩体的崩溃,以及 1963 年意大利 Vaiont 水库左岸总方量达  $2.75 \times 10^8 \text{ m}^3$  的巨型滑坡等一系列水电工程事故的发生,使人们清醒地认识到对边坡岩体破坏的力学机理研究的重要性。

对水库库区滑坡而言,主要是库水作用下的滑坡稳定性问题,包括水库诱发复活型滑坡和水库新生型滑坡两类。对水库复活型滑坡,前人对其进行了地质分析,提出了水库复活型滑坡的典型地质模型;建立了基于非饱和土理论的水库复活型滑坡变形与失稳的数学仿真模拟方法;应用可靠性理论与方法建立了水库型滑坡风险识别加固风险决策的方法。对水库新生型滑坡,前人从区域地质条件及局部构造分析的角度论述了库岸破坏的过程及控制因素,明确了新生型滑坡可能出现的部位;对水库新生型滑坡的两个最主要动力条件(水库蓄水及降雨)影响规律进行了深入研究;提出了水库新生型滑坡抗剪强度参数的确定方法;建立了水库新生型滑坡的预测评价方法,进行了三峡水库蓄水后库区新生型滑坡危险性宏观分区,但尚未达到小范围的个体预测程度。在滑坡稳定性研究方面,对于水库滑坡而言,其稳定性

分析与评价除了与普通滑坡类似之外,主要考虑水库水位周期性变化对滑坡稳定性的影响,目前已取得了显著进展和成效。

水库库水对滑坡的作用主要指水对滑坡岩土体的软化作用、泥化作用、动水压力作用、静水压力作用、冲刷作用、波浪作用、浮力减重作用及超孔隙水压力作用的叠加。一般认为,水库蓄水后使地下水位抬升,造成斜坡区地下水浸润线以下岩土体内孔隙水压力升高;当库水位回落造成地下水渗流速度过大时,在斜坡岩土体内产生渗透压力,是地下水动力场改变引起水库滑坡的两个重要原因。采用基于稳定流的达西定律,计算水库蓄水和水位涨落时斜坡内地下水浸润线和水流渗透压力,以此评价斜坡稳定性。但是,当水位升高速度较快时,尤其当水库水位降落时,斜坡岩土内的地下水并非稳定流,此时,稳定流分析结果将与实际有较大出入,进而影响滑坡工程治理的安全性。分析边坡稳定性对库水的动态响应,首先要研究边坡地下水在降雨、坡前水位等因素影响下的运动规律及相应的计算模型。长期的工程实践表明,边坡失稳的主要诱因是降雨、地下水、人类工程活动、地震等,其中,降雨是最常见和最活跃的诱发因素。人们早已发现,在雨季或紧跟着大的降雨之后,常发生边坡破坏。实际工程中,降雨对边坡稳定性的影响是通过地表水转化成地下水进而又通过地下水对边坡应力场和岩土体强度的共同作用来影响边坡的稳定性。但在实际工程中,还十分缺乏比较实用的分析方法,对边坡稳定性随地下水位变化的规律认识还相当有限。

### 1.2.2 滑坡评价与预测研究

滑坡预测预报工作,自20世纪60~70年代才开始,多数学者认为,日本学者斋藤(M. Satio)在60年代提出的滑坡变形预测经验公式<sup>[10]</sup>,可以作为滑坡预测研究工作的起点。滑坡预测预报广义而言,包括变形预测、空间预测及灾害预测<sup>[11]</sup>。从狭义的角度,滑坡的预测预报又仅指滑坡滑动时间的预报<sup>[12]</sup>。滑坡预测预报是一项比较困难的工作,至今尚无确切有效的方法。由于滑坡地质过程、形成条件、诱发因素的复杂性、多样性及其变化的随机性、复杂性,从而导致滑坡动态信息极难捕捉,加之滑坡动态监测技术的不成熟和滑坡预测理论的不完善,滑坡变形预测一直受到国内外学者的普遍关注。尽管如此,滑坡预测理论和方法也有了较大的发展,经历了从现象预报、经验预报到统计预报、灰色预报再到非线性预报的过程,目前已进入了系统综合预报、全息预报和实时跟踪动态预报的阶段。滑坡预测探索性研究的历程,大致可以划分为以下3个阶段<sup>[13~18,63]</sup>。

#### 1. 60~70年代现象预报和经验方程预报阶段

该阶段滑坡预测主要以现象预报和经验预报为主。人们利用滑坡的一些变形破坏现象和失稳前的宏观前兆现象,对滑坡失稳进行推断。这种预报是对滑坡前兆



反应的经验积累的直观预报方法。滑坡前兆现象主要有地面变形、地下水位突然变化、地声、地热、动物表现异常等<sup>[19]</sup>。显然,这种方法只适用于有明显前兆的滑坡,预报精度也不高,是一种定性的预报方法。1963年,我国曾利用这种方法成功地预报了宝成线须家河滑坡<sup>[20]</sup>。在这期间,日本学者斋藤通过大量的试验,提出了蠕变破坏3阶段理论,建立了加速蠕变的微分方程,利用该模型曾于1970年对日本的高场山滑坡进行了成功的预报<sup>[21]</sup>。此后,E. Hock根据智利的Chuquicamata矿滑坡监测位移-时间曲线提出了利用滑坡变形曲线的形态和趋势进行外延并推求滑动时间的外延法,其预报的理论依据与斋藤是相同的。由于这些方法是在一定条件下建立的经验公式,所求得的蠕变破坏时间属于概算,预报精度受到一定的限制,仅适用于中短期预报和临滑预报。因此,这一阶段的预报方法,是建立在“现象”和“经验”基础上的经验预报法。

## 2. 80年代位移-时间统计分析预报阶段

20世纪80年代,随着概率论、数理统计、灰色系统理论、模糊数学等现代数学理论的诞生和广泛应用,国内外学者在此基础上建立了多个滑坡预测模型。王思敬教授(1989)提出了边坡失稳前总变形量和位移速率的综合预报方法<sup>[22]</sup>。陈明东和王兰生(1988)首先将灰色系统理论中的GM(1,1)模型法引入滑坡位移-时间曲线的拟合外推<sup>[23]</sup>,提出了利用滤波灰色分析法进行滑坡的中期预报。晏同珍(1988)根据滑坡过程存在着与生物孕育、发生、消亡相似的位移特征,引入了Verhulst生物生长模型<sup>[24]</sup>,Verhulst模型目前已被广泛采用。李天斌根据斜坡变形破坏的位移量化曲线更接近Verhulst反函数曲线,提出了Verhulst反函数模型<sup>[25]</sup>。这一时期,张悼元 and 黄润秋还提出了黄金分割法<sup>[26]</sup>。此外,还有不少学者引入了马尔可夫预报<sup>[27]</sup>、模糊数学方法预报<sup>[28]</sup>、正交多项式最佳逼近模型<sup>[29]</sup>、梯度-正弦模型(崔政权)<sup>[30]</sup>、泊松旋回预报和图解法等多种方法,使滑坡预测方法向定量化方向迈进了一大步,滑坡统计预报方法体系得到逐步完善。但是,这一阶段的学者们主要注重预报方法的探讨而对与滑坡密切相关的一些基本问题,如观测资料的分析、处理,预报时序资料的选择,干扰信息的剔除与有用信息的增强等还认识不足,对滑坡基础研究与预报相结合方面的探讨也较少,也很少在利用上述先进理论和方法的同时,将预报参数与斜坡变形破坏和演变机制联系起来考虑,因而大大影响了预报精度。

## 3. 90年代以来非线性预报和综合预报模型及预报判据研究阶段

20世纪90年代以来,由于系统科学和非线性科学的发展及其在各个领域内的广泛应用,人们的认识论发生了质的变化。滑坡研究者开始认识到滑坡体系是一个开放系统,是一个灰与白、确定性与随机性、渐变与突变、平衡与非平衡、有序与无序等对立统一的系统。因此,许多学者引用了对处理复杂问题比较有效的非

线性科学理论来研究滑坡的预报问题,提出了多个滑坡预测模型,其中具代表性的有尖点突变和灰色尖点突变模型<sup>[31]</sup>、协同预报模型<sup>[32~33]</sup>、BP神经网络预报模型<sup>[34~36]</sup>等。同时还提出了一些滑坡预测的联合模型,如滑坡预测的BP-GA混合算法<sup>[37]</sup>及协同-分叉预报模型<sup>[38]</sup>等。在这期间,还提出了一些具有适用价值的学术思想,如非线性预报<sup>[39]</sup>、实时跟踪预报<sup>[40]</sup>、系统综合预报<sup>[41]</sup>和全息预报<sup>[32,33]</sup>等。

随着人们对滑坡预测与评价研究的不断深入,开始逐渐重视滑坡预测判据和综合预报模型的研究,并着手从物理现象和物理模型分析入手进行滑坡预测的探索。孙广忠等学者特别强调了宏观判据研究的重要性。廖小平依据弹塑性力学原理提出了滑坡预测的功率模型<sup>[42]</sup>。湖北省岩崩滑坡研究所<sup>[43]</sup>将预报判据归为3大类,即安全系数和可靠概率判据、变形速率判据,以及综合信息预报判据,并通过对三峡库区典型滑坡预测预报的实践,较为系统地提出了根据滑坡的各种变形破坏迹象及诱发因素等进行滑坡的宏观预报和综合预报。同时,人们也认识到滑坡预测不仅是一个纯方法问题,要实现较为准确的预报,必须将斜坡变形破坏机制分析与定量预报相结合,必须对与滑坡密切相关的基本问题进行研究,运用系统综合、系统分析、系统模拟的方法对滑坡系统进行识别、模拟及预测预报。目前,地质力学模拟和数值模拟作为一种有效的手段,在滑坡演变的动态过程与趋势预测中已被广泛应用。滑坡预测已从过去单一的现象研究、模型方法研究进入了综合预报阶段,并且逐步向实用化、系统化迈进<sup>[42~44]</sup>,现已初步开发了滑坡灾害预报系统(LTFS)<sup>[38]</sup>、滑坡监测预测预报数据库系统(LSMOS)<sup>[45]</sup>等。

近些年来,随着一些新的、先进的技术手段的应用和发展,一些相邻学科的渗透和新学科的兴起,为滑坡预测研究提供了新的理论方法以及观测、实验和计算手段。不少学者开始将GIS技术、专家系统等理论和方法运用于滑坡预测预报中<sup>[46~52]</sup>,如张华杰等开发了滑坡预测与风险评价专家系统LFEES<sup>[53]</sup>;袁相儒和谢广林开发了滑坡灾害预测专家系统LPES<sup>[54]</sup>;李彰明研究了露天矿边坡实用型专家系统PE-SOPS V1.0的设计与应用<sup>[55]</sup>;张金山等建立了露天矿边坡稳定性分析专家系统<sup>[56]</sup>;李东山采用专家系统的分析方法,从宏观定性的角度对滑坡的变形破坏阶段和破坏概率等进行了研究,并初步开发了滑坡综合预报专家系统<sup>[57]</sup>。此外,GIS技术因其在数据管理和空间分析等方面具有强大的功能,在滑坡灾害领域也得到广泛应用,如丁铭绩和张永波将地理信息系统应用于滑坡预测预报中,并基于MapInfo开发了滑坡预测预报软件系统<sup>[58]</sup>;殷坤龙在传统GIS技术的基础上,运用二次开发技术实现了滑坡灾害空间预测与Web-GIS的耦合,并在国内率先开展了基于Internet网络和GIS的Web-GIS滑坡灾害预测预报系统<sup>[59]</sup>,系统的核心是滑坡灾害预警预报系统模块。李彦荣从定量的角度,探讨了与滑坡变形预测密切相关的一些基本问题,并基于GIS初步开发了滑坡预测预报系统<sup>[60]</sup>。通过多年的努力,国内外在滑坡预测预报方面取得了显著的进展和成效,如表1.1所示。

表 1.1 滑坡成功预报的实例统计<sup>[61]</sup>

| 滑坡名称                  | 滑动时间                     | 预报时间                     | 误差时间               |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| 智利卡马塔滑坡               | 1969 年 2 月 18 日 6 时 58 分 | 1969 年 1 月 13 日          | 滞后 36 天发生          |
| 日本高场山滑坡               | 1970 年 1 月 22 日 1 时 24 分 | 1970 年 1 月 22 日 1 时 30 分 | 滞后 6 分钟发生          |
| 加拿大 Hogarth 滑坡        | 1975 年 6 月 23 日          |                          |                    |
| 中国宝鸡卧龙寺新滑坡            | 1977 年 5 月 5 日           |                          |                    |
| 中国湖北大冶铁矿象鼻山北帮滑坡       | 1979 年 7 月 11 日          | 1979 年 7 月 9 日发出<br>滑坡预报 | 滞后 2 天左右滑动         |
| 中国白银折腰山露天矿 IX 和 X 号滑坡 | 1983 年 7 月 9 日和 10 日     | 1983 年 7 月 5 日发出<br>滑坡预报 | 滞后 3 天左右滑动         |
| 中国金川露天矿采石场滑坡          | 1983 年 7 月 9 日           |                          |                    |
| 中国长江新滩滑坡              | 1985 年 6 月 12 日 3 时 45 分 | 临滑预报成功                   |                    |
| 中国长江鸡鸣寺滑坡             | 1991 年 6 月 29 日 4 时 58 分 | 1991 年 6 月 29 日          | 滞后 1 天发生           |
| 中国甘肃黄茨滑坡              | 1995 年 1 月 30 日 2 时 30 分 | 1995 年 1 月 31 日          | 滞后 21 小时<br>30 分发生 |
| 中国甘肃焦家村滑坡             | 1996 年 2 月 13 日 1 时 08 分 | 1996 年 2 月 12 日          | 滞后 1 天发生           |

### 1.2.3 三峡库区滑坡研究历史概况

长江三峡枢纽工程自 1956 年开始初期勘探以来,就注意到了库岸稳定性问题的重要性,对这一问题的研究,大致可分为 4 个阶段。

第一阶段是 1957~1965 年,早期的研究主要在地矿部系统进行,偏重于库区的工程地质测绘和对已发现的个别滑坡进行调查,虽不够深入和全面,但已注意到建库前后库区岸坡可能存在的稳定性问题,随后长江水利委员会、中国科学院、国家交通部等单位亦参与了库区工作。例如,王士天 1958 年对碚石至重庆的塌岸工程地质进行过调查,胡海涛、刘广润最早论述了三峡水库工程地质条件并把库岸再造作为重要的工程地质问题之一提了出来;地质三峡大队在 1959 年和北京地质学院的师生联合组队,对水库干流和主要支流进行过库岸稳定性调查,编写了 1:10 万“三峡水库工程地质测绘”报告,在此之后至 1975 年还进行过几次类似的调查。

第二阶段是 1965~1980 年,在初期的调查之后,就开始了近坝地段的个别重点滑坡崩塌的调研工作:1965 年地质部三峡工作处对链子崖进行了 1:2000 的工程地质测绘;1968 年开展了长期监测和勘探试验工作,与此同时,长江水利委员会也开始了对新滩滑坡 1:2000 的工程地质测绘,随后也逐渐进行了一些勘探、试验与观测(1977)工作。这一阶段主要的研究重点集中在新滩与链子崖两处,并作了较深入的研究,为新滩滑坡的复活滑动准确预报打下了良好的基础。除此之外,库区其余地段的研究工作也开展起来,发现了数十处滑坡与崩塌。例如,列举了 9 处重要的崩塌和 11 处滑坡,但对多数的滑坡与崩塌的认识还不深入,主要是调查了解地质背景、滑坡地形地貌、结构与性状等,对滑坡的形成机制和稳定性评价还没有作深入的研究。