

# 工程岩体变形与安全监测

GONGCHENG YANTI BIANXING YU ANQUAN JIANCE

李迪 马水山 张保军 张漫 著 |



长江出版社

水利部科技创新项目（SCX2003-21）资助

# 工程岩体变形与安全监测

GONGCHENG YANTI BIANXING YU ANQUAN JIANCE

李迪 马水山 张保军 张漫 著 |

长江出版社



图书在版编目(CIP)数据

工程岩体变形与安全监测/李迪,马水山,张保军,张漫著.

—武汉:长江出版社,2006.12

ISBN 7-80708-234-8

I.工… II.①李…②马…③张…④张… III.水利工程—围岩变形—监测 IV.TV554

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第142864号

工程岩体变形与安全监测

李迪 马水山 张保军 张漫 著

责任编辑:贾茜

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道1863号

邮 编:430010

E-mail:cjpub@vip.sina.com

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉中远印务有限公司

规 格:787mm×1092mm 1/16

14印张 330千字

版 次:2006年12月第1版

2006年12月第1次印刷

ISBN 7-80708-234-8/TV·46

定 价:28.00元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

## 作者简介



李迪,男,汉族,1937年5月生,湖南省茶陵县人。从事水工岩石力学及安全监测研究,教授级高级工程师。1961年7月武汉大学数学系偏微分方程专业毕业,同年9月分配到长江水利水电科学研究院(现长江科学院)岩基研究室(现岩基研究所)工作。1989年1月起在长江科学院大坝安全监测研究中心(所)(现工程安全与病害防治研究所)工作至今。历任岩基室主任工程师、监测中心副主任、监测所副所长兼总工程师。45年工作中,参加了乌江渡、葛洲坝、万安水利水电工程、葫芦口水库、长江三峡工程水库库岸、隔河岩工程及水库库岸、水布垭工程等的岩石力学试验研究、不均匀坝基稳定性计算分析和安全监测等工作。作为主要起草人和技术组成员负责《水利水电工程岩石试验规程》、《水利水电岩石试验规程》(补充部分)和《工程岩体试验方法标准》(国标)的现场变形试验规程的制订,作为起草人参加了《水利水电岩石测试仪器系列型谱》的编制。主持和承担了多项国家“七五”、“八五”科技攻关和三峡重点科研子题的研究,主持了隔河岩水利枢纽大坝及库岸滑坡安全监测及资料综合分析,作为领导小组成员负责三峡工程安全监测单项技术设计工作并承担部分监测设计。获1993年能源部、水利部水利水电规划设计总院科技进步一等奖,湖北省政府1997年科技进步二等奖,以及发明专利三项。与同事合著有《岩体变形试验与分层弹模计算》,作为副主编编写了《岩土工程安全监测手册》,参加编写董学晟主编的《水工岩石力学》和王思敬主编的《中国岩石力学与工程世纪成就》等书。公开发表论文40余篇,其中多次获长江水利委员会、长江科学院、湖北省科委、湖北省科协、湖北省人事厅的优秀论文奖。翻译交流英文专业文献数十万字,公开发表十余万字。曾任中国水利学会岩土力学专业委员会委员兼副秘书长,湖北省水利学会工程管理委员会副主任委员和水力发电学会施工专业委员会地下工程学组副组长等职。

## 作者简介



马水山,男,汉族,1966年6月生,湖北省潜江市人。从事岩土工程安全监测监控理论及信息自动化研究,教授级高级工程师,国家注册安全工程师。1985年9月考入长春地质学院(现吉林大学),1989年获地质系学士学位,1992年6月获长春地质学院地质系地质构造专业硕士学位;2004年3月获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业博士学位。1992年7月到长江水利委员会长江科学院大坝安全监测研究中心(所)工作,历任监测研究中心岩体监测室副主任、主任,监测研究所副所长、所长。1997年10月至1999年2月曾被长江水利委员会派往中国长江三峡工程开发总公司安全监测中心主持工作,任安全监测中心常务副主任。2002年4月调入长江水利委员会长江河道采砂管理局,历任综合处处长和水政监察总队砂管支队支队长,现任长江河道采砂管理局副局长。

10多年来,其先后参加了三峡、清江隔河岩、水布垭以及长江重要堤防隐蔽工程等重大工程项目的科研、监理与管理工 作,并作为工程安全监测项目负责人、技术负责人,主持完成了三峡、清江隔河岩、水布垭、三峡库区移民建设等工程20多个科研项目的工作;作为主要研究人员,参加了国家自然科学基金项目、院基金项目的工作;作为专业技术监督管理总负责人,在三峡工程安全监测众多科研项目实施过程中,主持了20多个项目的监理、管理与验收,以及多项监督管理规则的制定等工作;作为项目管理负责人之一,负责长江河道采砂管理远程可视化实时监控系统工程项目的技术与组织管理等工作。公开发表学术论文30余篇(EI收录8篇),编写各项科研成果报告20余份,其中“清江隔河岩水利枢纽库岸滑坡稳定性内观监测”研究项目获1997年湖北省科技进步二等奖,多项研究成果获长江水利委员会和长江科学院优秀成果奖,并有专利发明3项。参加编写了董学晟主编的《水工岩石力学》等书。曾经担任湖北省灾害防御协会减灾技术发展与应用工作委员会秘书长,中国水利学会岩土力学专业委员会岩石工程专门委员会委员,湖北省岩石力学与工程学会第三届理事会理事和中国岩石力学与工程学会测试专业委员会委员。2001年荣获第五届“武汉优秀青年”和“武汉市新长征突击手”称号。

# 序

工程岩体在建设施工的扰动下,边界条件和荷载条件都将发生变化,其应力、应变状态、环境(如水的赋存)等力学状态、甚至其力学性质都与天然的不同。这种变化对其稳定性的影响是岩石工程设计和工程施工及运行中首要关心的问题。在工程前期,只能通过模拟的方法来研究工程岩体的性状变化,结果是否正确,只有在工程建设后才能得到验证。对被扰动岩体的性质和状态进行实际的测试和量测,即工程岩体性状监测,是水工岩石力学研究中认识工程岩体性状及其变化最直接的途径,也是对前期的设计、模拟和计算结果进行验证最可靠的途径。

同时,进行工程岩体性状监测,可以及时了解岩石工程施工和运行中岩体稳定性的变化,为工程的安全监控提供重要依据。所以工程岩体性状监测又是为工程安全监控服务的,可以作为岩石工程的安全监测,成为水利枢纽工程安全监测系统的一个重要组成部分。

岩体性状监测多年的实践表明,变形和位移是岩体受扰动后最直接、最明显的性状变化,也是最容易监测到的变化。岩体的变形和位移及其变化发展,不仅直接反映了工程岩体的稳定(安全)状态,而且也是研究岩体被扰动前的初始条件、进行反分析的主要依据。

《工程岩体变形及安全监测》一书的主要作者,是从岩石力学性质试验研究领域转到岩体性状监测领域,进而专门从事工程安全监测研究,特别是水利水电工程的岩质边坡和水库库岸滑坡的稳定性监测的。二十年来,他们和同事们奋战在三峡、隔河岩和水布垭等大型水利枢纽工地和水库库岸,在十分艰苦的条件下坚持进行现场岩体性状监测工作,足迹遍及长江三峡和湖北清江沿岸几百公里范围,在滑坡、边坡、坝基、洞室等不同的工程岩体上,建立了一大批岩体性状监测网,持续不断地采集大量岩体变形、位移、渗压等监测数据,进行了及时的分析反馈,为这些工程施工和运行中的安全监控和预警作出了显著贡献,也为进一步开展相应工程的岩体力学性状变化研究和设计验证积累了丰富的资料。

本书就是上述监测实践经验的全面总结。作者首先对工程岩体性状监测历史和监测技术的发展作一简单的回顾,然后按监测工作的顺序,将他们在监测仪器、监测系统布置、数据测读、分析、反馈、应用等各方面的经验进行了系统的归纳和提炼,提出了可供具体实施和操作的意见。根据大量的实践经验,作者着重分析了地质条件、施工爆破、水库蓄水、降雨、时间、气温等因素对工程岩体变形(位移)监测数据的影响,深入研究了边坡(特别是堆积体滑坡)变形、滑动和失稳的过程和机理。最后以翔实的工程实例展示了变形监测在进行安全预报、优化设计和施工、建立预测模型、检验设计等方面的应用。

在众多关于岩体性状监测技术的著作中,本书有几个特点可以指出。首先,在监测仪器的使用方面,作者们大量应用了能够量测岩体深部位移的钻孔倾斜计,在一大批实际工程的监测中,全面加以应用,取得了对于这种仪器独到的、丰富的经验。其次,由于钻孔倾斜计量

测的是岩体深部与钻孔垂直方向的位移,特别适合于滑坡体内部状态及其演变的监控,对于寻找、研究滑动面和失稳机理具有表面位移监测手段所无法替代的作用。所以本书作者们的监测实践和贡献主要就是围绕着滑坡(特别是水库库岸滑坡)开展的。从滑坡启动开始,直至发生整体失稳的全部过程,他们对于滑坡体的各个层带的深部变形都进行了多方面深入的分析研究,取得了关于位移曲线分类、影响变形的因素、滑坡启动变形、变形发展规律、滑坡失稳机理、预报模型等多方面的成果。

总之,这是一本好书,不仅可以给从事工程岩体深部变形监测的实际工作者在方法和具体做法上以借鉴,还能为进一步研究滑坡机理和安全预报准则提供丰富的资料和数据。

应当强调的是,所有这些成绩都是在大量的工程实践和丰富的实测数据的基础上取得的。没有这样一个吃苦耐劳、配合默契的团体,没有这个团体在三峡、隔河岩、水布垭几个大型工程的坝基、坝肩、地下洞室多项岩石工程中,以及多达 27 处边(滑)坡(167 个钻孔)上长达 20 年的艰苦工作,是无法做出这些成绩的。在此,本人对他们致以深深的敬意。



2006 年 10 月

## 内容提要

这是一本介绍通过工程岩体安全监测方法来研究工程岩体变形的专著。本书系统介绍了长江和清江工程岩体安全监测从监测仪器到监测布置实施全过程的原则、方法、经验和教训；以变形安全监测的资料为基础分析了影响工程岩体变形的因素，分析了工程岩体变形的性状，特别是发现了堆积体滑坡滑带变形和破坏的规律，在这些规律的基础上提出了变形和破坏阶段可控的安全预警指标；最后，首次提出了建立第三类试验室研究堆积体滑坡的设想。

本书可供水利水电、矿山、交通、建筑、国防等领域从事与岩石力学及安全监测专业有关的科研、教学、工程设计和施工的技术人员和师生参考，从中开拓科研思路，挖掘新的研究课题。





## 前 言

水利水电工程建设的发展是工程岩体安全监测发展的主要推动力,监测技术的发展、监测新仪器的出现是促进岩体监测发展、取得丰富成果的必要条件。事实上,由于周恩来总理关于兴建三峡工程的“雄心不变,加强科研”指示的激励,20世纪70年代中期,长江科学院开始自行研制适合于坚硬岩体深部变形监测的多点位移计,以适应三峡比选坝址——太平溪坝址地下厂房施工、运行期监测的需要,于1979年初步研制成功,1981年又研制成功能抗震和回收的锚头,虽然后来坝址选定为三斗坪坝址,以坝后式厂房为主,但这种精密的钢弦式多点位移计在1981~1982年首次应用于鲁布革工程引水隧洞施工期围岩变形监测,围岩为致密坚硬、完整的灰质白云岩,仍然取得很好的效果。在1982~1983年接着应用于我国推广新奥法锚喷支护快速施工的“六五”国家重点科技攻关项目——引滦八一林输水隧洞的施工安全监测;1983~1985年又参加了国家“六五”计划中的重点建设项目——鲁布革工程地下厂房的模拟洞试验,这是当时国内地下洞室围岩安全监测规模最大、项目最全、测试手段最多的一次。1986年2月17日岩基研究室成立岩体工程监测研究课题组,根据三峡工程双线船闸设计的需要,结合勘探平洞的开挖,在船闸Ⅱ—Ⅱ线附近的8#勘探平洞中开两条平行试验支洞,进行围岩变形监测,配合现场和室内动、静变形试验、地应力测量、研究岩体的变形特性和进行位移反分析的工作,两个试验支洞分别由长江科学院和原长江流域规划办公室勘测总队进行试验,经过一年的经费争取,试验于1986年4月开始,同年完成。上述10年间主要开展的是地下洞室围岩变形的安全监测,是长江科学院安全监测进入实战的第一阶段。

1985年6月12日清晨,距长江三峡三斗坪坝址上游26.5km的新滩古镇发生总体积为 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的大型堆积体滑坡,滑动面积约1.1 $\text{ km}^2$ ,虽然新滩古镇毁于一旦,但由于事前进行了安全监测预报,镇上无人伤亡。新滩滑坡的发生除了给人们以警示作用外,还使人们看到了安全监测的重要意义。作为三峡工程的前期科研和“六五”国家重点科技攻关项目,从1986年起,进入安全监测发展的第二阶段。在这个阶段中,首先,先后对新滩滑坡、黄腊石滑坡和链子崖危岩体3个三峡工程重点库岸滑坡开展了岩体深部变形监测,并找到了适合监测滑坡深部变形的行之有效的仪器——钻孔倾斜仪,分别在上述3个滑坡(危岩)体上埋设2~3个测孔不等。黄腊石滑坡于1988年埋设,于1989年监测到滑动带的出现,滑动带正好位于堆积体与基岩的交接面,表明一旦滑坡体失稳,将出现浅层滑动破坏,使长期以来关于黄腊石滑坡体将是浅层滑动还是(沿基岩中软弱面)深层滑动的争论有了一个确切的回答。3个滑坡(危岩)体的监测创下了目前测孔最深(164m,链子崖危岩)和监测历时最长(新滩滑坡,1987年1月~2003年6月)两项记录。根据新滩滑坡的钻孔倾斜仪监测资料进行位移反分析,《新滩滑坡位移反分析》一文在1991年德国亚深第七届国际岩石力学会上交流,当时国际上开展滑坡位移反分析的尚不多见。

1987年清江隔河岩水利枢纽开工建设,为岩体安全监测带来了新的机遇;根据要求《建立长江科学院大坝安全监测研究中心》的文件,于1989年1月5日召开成立大会,长江科学

院岩基监测和大坝监测两个专业(共 27 人)合并到一起,在当时水利水电系统中,算是一支颇具实力的专业监测队伍;加上湖北清江开发公司对安全监测的重视,从 1987 年至今,20 年来承担的岩体安全监测有导流洞及其解体边坡、左右岸坝肩边坡、第二级垂直升船机边坡等施工期安全监测。除上述长江科学院承担的施工期安全监测外,隔河岩施工期安全监测还有武汉大学承担的引水隧洞施工期安全监测,武汉理工大学承担的引水隧洞进口、出口及厂房高边坡施工期安全监测,长江科学院负责施工期安全监测情况综合反映简报和隔河岩水利枢纽大坝安全监测资料综合分析(后者有原长江流域规划办公室勘测总队和枢纽处参加)。此外,长江科学院还承担了引水隧洞出口及厂房高边坡、第二级垂直升船机高边坡运行期安全监测,以及隔河岩水库库岸滑坡的稳定性(内观)监测工作。

隔河岩工程导流洞观测试验洞是导流洞的模拟试验,试验目的是监控导流洞出口施工安全和开展光面爆破技术、锚喷技术、锚喷材料及喷射工艺、优化衬砌设计等施工科研工作。通过观测试验洞的试验研究,取得了三次成功安全预报,以及将出口段双层钢筋混凝土衬砌改为锚喷支护与单层钢筋混凝土复合型支护,灰岩段由原来的双层钢筋混凝土衬砌改为顶拱采取支护和挂网、变墙采取锚喷支护和薄层单混凝土复合型支护,节约经费 100 多万元,缩短一年工期等明显效益。引水隧洞出口及厂房高边坡的监测是运行期监测设施兼作施工期监测的成功工程实例。通过该高边坡的监测,认识了岩体上硬(灰岩)下软(页岩)的一些变形特性;通过对岩体高边坡温度变形场的计算分析,认识了气温对均匀岩体变形的影响不是主要因素,并取得了“确定边坡位移方向的管形线方法”和“利用边坡岩体位移场计算识别温度对深部位移影响的方法”两项发明专利。还应当强调指出,隔河岩工程引水隧洞出口及厂房高边坡运行期安全监测设施兼作施工期安全监测的成功经验,在作者进行长江三峡工程永久船闸高边坡单项技术设计时推广到永久船闸的施工期安全监测设计中,并再一次获得了成功。

随着隔河岩工程的进展,从 1991 年起陆续实施水库库岸滑坡稳定性监测,到 1993 年为止,基本完成杨家槽、覃家田(含康岩屋危岩体)、茅坪(含白岩危岩体)、墓坪和枣树坪 5 个滑坡、2 个危岩体的以钻孔倾斜仪深部变形为主包括钻孔渗压、地表裂缝变形和雨量的监测,取得了水库蓄水前、蓄水期、运行期全过程中滑坡变形、变形与降雨量、变形与地下水位、降雨量与地下水位之间规律的丰富而宝贵的资料,积累了钻孔倾斜仪在滑坡体复杂介质中钻孔、埋设等方面行之有效的经验,探索出了利用钻孔倾斜仪及时发现滑动面,通过地质调查分析了解滑动面的性质,配合现场宏观巡查弥补仪器覆盖面的不足和根据钻孔倾斜仪测得的变形资料建立变形预报模型预测滑坡体变形发展趋势四个相结合的一整套方法,为茅坪滑坡提前移民决策提供了可靠依据,为杨家槽滑坡加强监测、不予搬迁的决策节约资金约 2000 万元。1996 年专家鉴定认为,清江库岸滑坡监测为我国库岸滑坡监测闯出了一条新路。该项成果获 1997 年湖北省科技进步二等奖。至今,我们一直仍在进行隔河岩工程水库库岸滑坡稳定性的监测。

由于三峡工程的兴建,从 1995 年年初开始,陆续实施三峡永久船闸高边坡一期工程施工期安全监测、左岸厂房 1#~6# 坝段及厂房岩石开挖边坡安全监测、大江截流及二期围堰工程安全监测以及永久船闸二期工程施工期安全监测工作。三峡永久船闸边坡岩体深部变形、平洞岩体应力应变、边坡锚杆应力、岩体卸荷松弛、岩体渗流、边坡锚固预应力等多专业的监测成果为综合分析永久船闸边坡施工期的整体及局部稳定、验证设计和指导施工提供

了可靠依据。该项成果得到了中国三峡开发总公司的认可。

21 世纪的今天,随着世界上同类型最高(233m)的清江水布垭面板堆石坝的兴建,再一次带来了我们滑坡监测史上难得的机遇。说它是难得的机遇,这是因为:第一,这是处于开挖施工中的滑坡,滑坡分布于坝址下游 2km 范围的左右岸,离坝轴线最近的大岩淌滑坡距挑流鼻坎仅 300 多米。第二,这是有变形的滑坡,随滑坡的施工、整治过程,有的滑坡出现的变形大且持续时间长。第三,滑坡多而集中,大坝下游左岸有大岩淌、马岩湾、台子上和古树包 4 个滑坡,右岸有水井坪滑坡。5 个滑坡中,除古树包为土坡外,其他都是堆积体滑坡。同时具备上述 3 个条件的滑坡对我们研究来说真是 20 年一遇。由于我们得到清江水布垭建设公司的信任,从 2000 年起长江科学院陆续承担了上述滑坡仪器埋设、观测和资料分析工作。通过 6 年来在水布垭工程上述 5 个滑坡开挖和加固整治过程中以深部变形为主的施工期监测,进一步展示出钻孔倾斜仪的独特优越性,使我们获得了宝贵的堆积体滑坡变形——发展——破坏——破坏后的变形全过程曲线,发现了堆积体滑坡和滑带变形、破坏的规律,这些规律成为我们制定更为合理的实际可行的安全预警标准的可靠依据。及时总结这些工作中得到的经验、规律和教训,对于今后工作的开展和岩石力学的研究无疑是有益的。

上面提及的岩体变形监测的工程只是长江科学院涉及监测工程的一部分,而本书总结的也不过是上述提及工作的一部分而已。

本书的主要目的是利用工程岩体安全监测中得到的变形性状监测资料去研究工程岩体变形的发生、发展和破坏过程中的原因、影响因素、互相关系和变化规律,然后根据所得规律建立的指标(标准)评价、预报工程岩体达到和将要达到的变形和破坏阶段,以防止和减少安全事故的发生。

书中采取的主要分析方法是变形曲线分析法,包括变形的空间分布和时间过程两大类曲线,即“让曲线说话”。

表述方法上不是按工程分章,而是按变形分析内容划分章节,以避免过多重复和枯燥。现就各章内容简介如下。

总论。总论中首先强调指出,本书讨论的是水利水电工程岩体。水利水电工程岩体是具有自己特定形式的边界条件和荷载条件的天然岩体,作为一种天然介质,以具有地质结构面、初始应力和水而成为与大坝混凝土有本质区别的复杂介质。以此为出发点说明了工程岩体、工程岩体变形、工程岩体变形安全监测的含义和内容;阐述了工程岩体变形的机理,指出工程岩体变形主要是结构面的变形,工程岩体变形安全监测重点是控制产状不利结构面的安全这些基本的岩石力学原理。

第 1 章水电工程岩体安全监测的发展,首先介绍了以检验工程设计为主要目的的“原型观测”到以监控工程安全为主要目的的“安全监测”的思想发展过程和重要意义。其次,介绍了由于监测思想的发展带来的工程岩体监测技术的发展,多点位移计的出现和新奥法的推广,推动了地下工程的快速发展;钻孔倾斜仪的推广和逐步普及促进了岩石边(滑)坡工程的发展,在 1.3 节中以文字和列表的形式扼要叙述了其中部分工程的监测技术的发展和应用效果。最后在 1.4 节中介绍了利用变形监测资料进行变形反分析研究的发展,从总的发展过程看,地下洞室的变形反分析发展最早,研究较为深入,岩石滑坡体的变形反分析起步较晚,有待在滑坡体工程监测工作深入的基础上逐步发展和提高。限于水平,本章的叙述难免

有所遗漏,请读者原谅。

第2章工程岩体安全监测,在简要介绍了工程岩体监测的分期和一般要求的基础上,着重介绍了我们常用的以深部变形监测为主的仪器种类、工作原理、埋设技术要求、观测技术要求、观测数据的整理分析要求、观测资料的反馈方式以及监测仪器的布置。重点介绍了钻孔倾斜仪在复杂滑坡体上钻孔和密实充填的成功经验;按地下洞室、边(滑)坡和坝基3类工程10个工程实例重点介绍了监测仪器的布置原则和方法,介绍时力求使岩石力学的基本原理与具体的工程实际相结合。最后,以小结的形式总结了安全监测实践中的主要经验和教训。

第3章影响工程岩体变形的因素。岩体中存在的产状不利结构面、初始应力和水是引起变形的主要内在因素(后两者因往往看不到而不提及)。爆破开挖、蓄水、降雨、水库诱发地震以及采煤等是引起变形的主要外部因素,时效对工程岩体变形的影响较小。虽然为方便起见,分析这些影响因素时,是逐个因素分别进行的,但实际影响一般是综合作用的结果。例如,岩体本身的不利结构面发生变形往往是施工扰动、蓄水或雨水转变成地下水后水位的升高、浸泡、诱发的结果。施工扰动诱发变形的机理对地下洞室、边(滑)坡和坝基又是各不相同的。分析这些影响因素时,主要是依据变形曲线,解释这些变形曲线主要根据基本的岩石力学原理。这些基本原理在总论中集中作了扼要阐述。

第4章工程岩体变形分析。我们知道,从以监控安全为主要目的的安全监测来说,希望变形监测中工程岩体少变形、不发生危及工程安全的大变形和持续变形。但从希望通过安全监测中研究岩体变形性状的角度来说,希望岩体有变形可测,以便从变形变化过程中认识岩体的变形性状,这是一个客观存在的、不以人们主观意志为转移的矛盾。应当说,不变形是不存在的,只要一施工开挖,就会有变形发生。因此,通过工程岩体变形监测一般可以测到这些变形。本章内容就是作者们根据变形监测资料开展岩石力学研究成果的总结。由于水布垭工程下游大岩淌滑坡体提供了爆破开挖和加固整治施工过程的工程实例,使我们有幸取得了这个全过程的宝贵而丰富的变形——破坏——变形全过程曲线,发现了堆积体滑坡滑带变形和破坏从主滑面开始,然后自下而上发展的规律,依此规律,提出了滑带变形和破坏阶段可控的预警指标,详见4.2节。根据长江黄腊石滑坡1989年滑带出现到2001年滑带基本破坏的变形资料,我们又提出了滑动面完整性(或破坏性)指标定量评价滑动面稳定性的 $S_i(S_f)$ 指标分析法,详见4.3节。滑坡监测资料的因子分析和关联挖掘分析是分别分析影响监测资料因素的主次关系和分析影响滑坡变形的因素和条件的方法,这种分析方法以前在滑坡体中应用较少,作为尝试,分别总结在4.4节和4.5节中。以隔河岩工程引水隧洞及厂房高边坡为例进行了岩体高边坡温度变形场计算分析,计算表明,气温变化对边坡岩体深部变形有影响,但影响很小。气温变化不是边坡孔口累计过程线上下起伏的主要原因,详见4.6节。在隔河岩工程上硬(灰岩)下软(页岩)的高边坡中出现边坡孔口累计变形—深度曲线朝山里移动的反常现象,采用管形线分析,发现是由于钻孔倾斜仪孔底变形大、孔口变形小,不符合钻孔倾斜仪的基本假定所造成的,详见4.7节。“利用边坡岩体温度位移场计算识别温度对深部位移影响的方法”和“确定边坡位移方向的管形线方法”分别于2006年和2004年获得发明专利。

第5章工程岩体变形监测的应用。作为安全监测的目的有三个,一是监控安全,二是优化设计和施工,三是为岩石力学研究积累资料。工程岩体性状研究的部分成果已在第4章

中总结,本章只介绍变形监测在监控安全、优化设计和施工方面的应用。隔河岩工程导流洞观测试验洞的研究使导流洞工程建设经费节约上百万元,导流洞提前一年打通。基于导流洞围岩变形监测的安全预报和支护设计优化也发挥了重要作用。长江链子崖危岩体整治施工中,根据钻孔倾斜仪变形剧增的及时反馈,调整了施工方案,避免了施工事故的发生。根据变形预测模型的预测和现场巡视调查,茅坪滑坡体呈趋势性增长,及时进行了移民,避免了因房屋倒塌造成的人员伤亡和财产损失。在新滩滑坡深部变形监测的基础上开展了滑坡体位移反分析的尝试,提出了利用钻孔倾斜仪测量到的相对变形进行反分析的方法。按深部变形曲线不同形式将岩石边(滑)坡分成稳定型、滑动型、坍塌型和倾覆型四类变形曲线并应用于边(滑)坡安全监测的自动化改造,取得了变形传感器布置合理和节约经费的良好效果。

回顾与展望。从回顾 20 年来工程岩体变形监测的历程,在看到安全监测对岩石力学研究所起重要作用的同时,也深感其存在一定的局限性。当前应建立以研究工程岩体变形性状为主的第三类试验室,例如,可以首先开展变形、地下水、雨水为主要项目,以研究堆积体滑坡变形性状为主要的监测,以期验证堆积体滑坡变形和破坏的规律,完善变形、破坏阶段可控的定量预警标准,减少滑坡灾害给人民生命财产带来的损失。

附录。回想 10 年前,作者为收集一些滑动曲线,费了很大的功夫。基于此,在附录中,我们将长江科学院监测到的滑动曲线共 17 组列出,供读者参考。

本书作者是在 1989 年成立长江科学院大坝安全监测研究中心(以下简称监测中心)时由岩基研究室和材料结构研究室监测专业的人员合并及以后陆续走到一起的,此书是作者们近 20 年来在长江、清江水利水电工程建设安全监测实践中的总结。

从组建长江科学院监测中心至今的十多年间,原长江科学院副院长董学晟教授级高工对于监测专业的发展倾注了很多心血,对于监测技术提高一直给予具体的指导,最近又欣然为本书作序,并提出了宝贵的意见,在此,我们表示衷心的感谢。

感谢 20 年来进行工程岩体安全监测工作过程中历任、现任所领导和同事们在工作上的关心、支持和帮助,感谢齐欢教授在“八五”科技攻关协作中的卓有成效的工作,本书中取得的点滴成果都是大家共同努力的结果。

感谢长江科学院和水利部科技创新项目(SCX2003-21)给予出版本书的资助,使本书的出版得以顺利进行。

最后,作者要衷心感谢自己的妻子(或丈夫)彭景文、陈红燕、焦发解和曹骏,在作者长期的现场监测工作期间,她(他)们独自承担着繁重的家务和子女教育工作,本书中的逐字逐句无不浸透着她(他)们的辛勤劳动和无私奉献。

全书由李迪、马水山、张保军、张漫合著,限于作者水平,书中的错误难免,有的提及的也可能是挂一漏万。作为抛砖引玉,恳请读者指正。

作者

2006 年 12 月于武汉

# 目 录

总论 .....	(1)
参考文献 .....	(5)
第 1 章 水电工程岩体安全监测的发展 .....	(6)
1.1 概述 .....	(6)
1.2 安全监测思想的发展 .....	(6)
1.3 安全监测技术的发展 .....	(8)
1.4 变形反分析的发展 .....	(11)
参考文献 .....	(13)
第 2 章 工程岩体安全监测 .....	(16)
2.1 概述 .....	(16)
2.2 监测仪器 .....	(18)
2.3 观测技术要求 .....	(37)
2.4 观测数据的整理分析要求 .....	(39)
2.5 观测资料的反馈形式 .....	(39)
2.6 监测仪器的布置 .....	(40)
2.7 现场巡查 .....	(71)
2.8 小结 .....	(72)
参考文献 .....	(73)
第 3 章 影响工程岩体变形的因素 .....	(74)
3.1 概述 .....	(74)
3.2 地质条件对变形的影响 .....	(74)
3.3 爆破开挖对变形的影响 .....	(78)
3.4 蓄水对变形的影响 .....	(86)
3.5 降雨对变形的影响 .....	(102)



# 总 论

## 1 目的

写总论的目的在于,对本书书名涉及的工程岩体、工程岩体变形和工程岩体变形安全监测的含义、内容作出说明,并根据岩石力学的基本原理,对工程岩体的变形机理和变形安全监测的基本原则作出统一阐述,避免作者在书中过多重复,便于读者阅读和了解全书。

## 2 研究对象

本书研究的对象是水利水电工程岩体,是属于地球的最表层的一部分。我们知道,地球靠地表的一层叫地壳,地壳位于地幔之上,平均厚度为 20~30km,地壳厚度因所在地区不同而异。大陆较厚,一般为 30~40km;大陆上的山地又比平原厚,如青藏高原及天山地区厚达 70km 左右。海洋地区相对大陆地区则薄得多,例如,大西洋和印度洋地区厚为 10~15km,太平洋中央厚仅 5km。地壳的下面直至距地表 2900km 深度范围内为地幔,地幔以下至 6371km 深处则为地核。本书研究的对象主要是地壳表层数百米至 1000 米范围内、水利水电工程岩体安全监测所涉及的岩石,相对研究地震、地热、地温所涉及地球的深度而言是很浅的一层岩石。

岩石是一种储蓄很高能量的物质,它是由矿物组成的,矿物则是由自然元素或其化合物构成的。由于成矿过程中的各种化学的、物理的作用,它们绝大多数呈结晶状。世界上虽已发现的矿物有 3000 多种,但岩石中常见的造岩矿物只有 20 多种。其中以石英、长石、云母、角闪石、辉石、方解石、黄铁矿和铝土矿等最为常见。以单质元素出现的矿物,如金、银、铜、锑、铋、金刚石等则极少,仅占地壳总重量的 0.1%,绝大多数的矿物都是以两种以上元素的化合物形式出现的。

## 3 工程岩体

本书将室内岩石力学试验研究的岩石对象称为岩块,将勘探平洞进行弹模、抗剪等试验研究的岩石对象称为岩体,而将进行工程安全监测的岩石对象,称为工程岩体。水利水电工程岩体主要是大坝岩基、地下洞室围岩和岩石边(滑)坡。

工程岩体具有自己特定形式的边界条件和荷载条件:①大坝岩基。以大坝建基面、河床和左右岸岸坡为自己的边界;施工期的主要荷载为不断加高、增多的坝体自重,运行期的主要荷载除大坝的自重(固定)外,还有起伏变化的上下游的河水和日益增加的泥砂压重等。②地下洞室围岩。以围岩表面为自己的边界;施工期围岩表面为自由面(法向和切向应力为零),运行期主要荷载为有压或无压水流。③岩石边(滑)坡。在本书中岩石边(滑)坡表示包括岩石边坡和滑坡在内的一个术语,岩石边坡和滑坡都是山体斜坡,岩石滑坡指历史上已经滑动过或(和)现在存在潜在滑动危险的岩石斜坡,除此以外,天然的和人工削(切)的岩石斜坡都称为岩石边坡。特别应说明的是,我们称三峡双线船闸边坡为深切岩石边坡。滑坡除



作为名词表示是斜坡的一种山体外,也常作为动名词表述山体发生滑动灾害的现象。为了区别两者的含义,在本书中可能发生混淆时,常以“滑坡体”代替作为名词含义的“滑坡”。岩石边(滑)坡以主滑动面(如果存在的话)和斜坡坡面为自己的边界。对于水库库岸边(滑)坡主要荷载有库水、雨水、后缘来自上部的坍塌岩块的压重(如新滩、茅坪滑坡体)等。

工程岩体区别于混凝土介质的显著特点是:①工程岩体中存在断层、裂隙、夹层、层面以及层理等结构面,一般不连续并成组出现。由于结构面具有定向性,因此,工程岩体是一种不均匀、不连续和各向异性的介质。②工程岩体中存在初始应力,初始应力主要是由地质构造运动和自重作用形成的地质力学属性,并从变形和强度两个方面影响着岩体的力学性质。③工程岩体中存在水,更具体地说就是岩体的裂隙和孔隙中存在水,水以静态和动态水两种形式出现并影响着岩体的物理和力学性状。工程岩体的上述三个特性使它成为与宏观上为均匀、连续和各向同性的混凝土介质本质上不同的复杂介质。

#### 4 工程岩体的初始应力

人们普遍认可的初始应力主要是由地质构造运动和岩体自重作用产生的一种地质力学属性。前者是以水平向应力为主的形式出现,后者是以铅垂向应力的形式出现。除背斜褶皱区域外,均以压应力形式出现。初始应力不仅在深山、峡谷、厚覆盖层的地区出现,在开阔的河谷地带也可能存在,例如,1976年开挖葛洲坝水电站二江电站厂房基坑时出现预裂爆破孔错位6~8cm的现象,就是我国首次发现开阔河谷明显出现地质构造水平初始应力的工程实例。后经现场实测,水平向应力为2.4~3.0MPa<sup>①</sup>,曾引起水利水电同行的震惊。高应力地区的地下洞室开挖时会出现岩爆和岩芯饼化现象,如雅砻江上的二滩水利枢纽实测到的玄武岩的应力水平较高,最大主应力达30.3MPa<sup>②</sup>。1994年华东勘测设计院科研所在雅砻江上的锦屏二级水利枢纽采用水压致裂法测得以自重应力为主导的初始应力高达45~50MPa。初始应力场不仅是地下洞室轴线的方位、形状和几何尺寸设计中的重要参数,分析岩体长期稳定性的科学依据,而且是影响地下工程岩体变形的主要因素之一。初始应力以弹性应变能的形式储存在岩体中,平时不为人们所见,一旦受到扰动(如钻孔,开洞,削坡等),它就会以变形的形式表现出来而为人们所察觉。初始应力的应力解除法就是根据这个原理设计出来的,岩体变形监测就是以它的直观且比应力监测操作简单而得以广泛开展的。此外,采用监测到的变形进行位移反分析的方法可以把初始应力推求出来。

#### 5 工程岩体中的水

工程岩体中存在水是工程岩体区别于混凝土介质的又一大特性。研究岩体中的水必须把地下水和降雨的雨水联系在一起研究。地下水的存在对岩体的物理力学性质产生多方面的不利影响。水使岩体的含水量增加,结构面的有效正应力、 $f$ 和 $c$ 值降低,导致岩体的抗压强度和结构面的抗剪强度降低,岩体的变形性增强;地下水形成的地下水位或渗水压力(姑且仍采用这个目前有争议的术语)往往会给不利的结构面(如滑动面)以推力,加速岩体

① 陈彦生等. 葛洲坝水利枢纽大江地应力的水压、破裂法测定. 长江水利水电科学研究院. 1982年5月

② 陶振宇, 杨子文. 地应力——岩体性状的一个主要因素(以二滩为例). 武汉水电学院, 电力部成都院科研所. 1981年5月