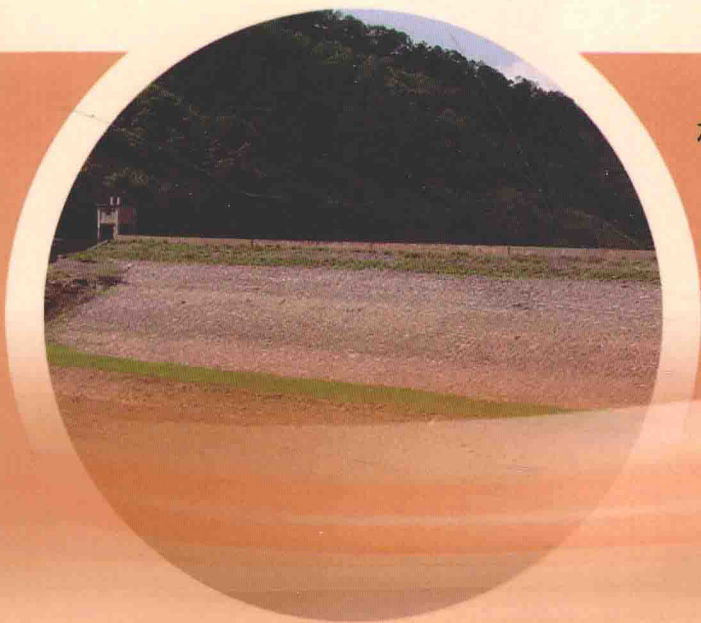


红土大坝运行安全的 研究与实践

杨华舒 符必昌 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



中国和平出版社

红土大坝运行安全的研究与实践

杨华舒 符必昌 著

中国科学技术出版社
中国和平出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

红土大坝运行安全的研究与实践/杨华舒, 符必昌著. —北京:
中国和平出版社: 中国科学技术出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 5137 - 0943 - 9

I. ①红… II. ①杨…②符… III. ①红土—土石坝—运行—
安全鉴定—研究 IV. ①TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 086082 号

红土大坝运行安全的研究与实践

杨华舒 符必昌 著

出 版 人: 肖 斌

责任编辑: 陈海鸥 王晓义

装帧设计: 中文天地

责任印务: 石亚茹 张建农

出版发行: 中国和平出版社 中国科学技术出版社

地 址: 北京市海淀区花园路甲 13 号 7 号楼 10 层 (100088)

北京市海淀区中关村南大街 16 号 (100081)

发 行 部: (010) 62173865 (010) 82093713

网 址: www. hpbook. com <http://www. cspbooks. com. cn>

投稿邮箱: hpbook@hpbook. com

经 销: 新华书店

印 刷: 北京京华虎彩印刷有限公司

开 本 720mm × 1000mm 1/16

印 张 14. 5

字 数 320 千字

版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

(版权所有 侵权必究)

ISBN 978 - 7 - 5137 - 0943 - 9

定价: 40. 00 元

(本书如有印装质量问题, 请与我社发行部联系退换)

内容提要

我国的土质堤坝数量居世界第一。由于历史原因，我国也是世界上大坝的病险高发的国家之一。迄今为止，我国在病害机理、定位诊断等研究领域仍有较多缺憾，兴建和修复技术仍存在谬误和不足，导致许多土坝的经济寿命远低于设计标准，甚至出现了“维修加重病害”的怪现象。

本书集结作者三十余年承担的大量国家级、省部级重点项目的研究成果，主要针对我国数量较多的红土大坝展开研究。其主要内容为：侧重于细观和微观角度，试验分析了坝料劣化的本源机制，获得了水泥等碱性加固材料损伤红土堤坝的原理，并建立了土坝运行过程中，红土的各种物质损失与工程指标之间的定量关系式；提出了平板、弧形钢闸门的现场安全检测、推算、验证细则，并就测试过程中容易出现的测点位置、信号变送等问题进行了阐述；在对传统的土坝除险加固技术进行剖析的基础上，侧重研究了内置土工膜的破损定位难题，从温变、应变角度获得了5种定位阈值；结合企事业单位委托的大量土坝安全鉴定任务，讨论了鉴定资料的来源和分析、评价细则，并归结至典型红土大坝的安全鉴定实践之中。

本书汇集了较多具有普遍适用意义的研究成果，主要供土石坝病害防治领域的研究人员借鉴，也可供地质灾害防治、尾矿坝病害诊断、岩土工程、工程监测、大坝安全鉴定等领域的科技人员使用。

第一作者简介



杨华舒，1958 年出生于重庆。现任昆明理工大学教授、硕士与博士研究生导师，兼任水工结构病害防治研究所总工程师。长期受聘为国家自然科学基金项目评审专家，并长期兼任美国格理集团专家团（Gerson Lehrman Group）的资深技术顾问，被首批列入教育部“学位与硕士研究生教育专家信息库”、首批入选《云南省科技志》，并被云南省首批授予教学科研带头人称号。

1982 年 1 月、1988 年 7 月分别毕业于四川大学和同济大学，分配到昆明理工大学从事教学和科研工作，主讲过多门技术基础课和专业课。擅长将先进的教学方法和前沿科技成果融入教学的各个环节。多次获得教学质量奖、教学优秀奖、教学论文奖、优秀教师奖、现代教育技术奖等；指导的学生有多人次获奖并获得奖学金；主编出版的教材被审定为普通高等教育“十二五”规划教材，云南省“十二五”重点规划教材。

曾在漫湾巨型水电工地担任监理工程师，并承担云南省曼棍电站、西双版纳葫芦岛电站的主要设计任务，形成了较好的工程素养。主持完成了 3 项国家级项目，以及其他科学基金资助的项目、工业重点项目等纵向普适性研究 11 项，企事业单位委托的横向科技研究 24 项；目前正在主持国家自然科学基金项目的研究。以第一署名提交大坝安全鉴定和工程设计成果 52 套（逾 300 万字）；迄今已经在国内外发表论文 69 篇，其中被 SCI、EI 收录二十余篇；领衔申报并获准专利权 9 项。研究成果分别被鉴定居国际、国内先进水平，或国内领先水平，十余次获得政府和学术机构的奖励。

前 言

我国的水库及大坝数量居世界首位。根据 2013 年发布的《第一次全国水利普查公报》，我国建成水库 98002 座，其中以土石坝为挡水建筑物的小型水库 93308 座，占水库总数的 95.2%。这些水库在防洪、灌溉、供水、发电以及水产养殖、旅游资源开发利用等方面发挥了巨大的作用，取得了令人瞩目的社会效益和经济效益。但由于历史原因，大部分水库的防洪标准偏低，建筑物存在不同程度的质量问题，许多土坝的病险情况十分严重，这不仅明显影响了综合效益的发挥，更严重威胁着人民的生命财产安全。自 1954 年有记录以来，全国已经发生大坝溃决事故 3515 次，其中小型土石坝的溃坝占比逾 98%。1975 年 8 月河南省板桥、石漫滩两座水库的土坝溃塌，冲毁了 58 座小型水库、40 座桥梁，造成重大人员伤亡，冲走牲畜 30 万头、猪 72 万头、火车车厢 1180 节，直接受灾人口达 1100 万。又如 2013 年 2 月新疆联丰小（二）型水库、黑龙江星火小（一）型水库、山西曲亭中型水库等相继溃坝，均造成了显著的人员伤亡和经济损失。

据统计，我国降等与报废的小型水库累计已达 4846 座，其中小（一）型水库降等 366 座、报废 224 座；小（二）型水库降等 2836 座、报废 1420 座。小型水库的挡水建筑物绝大多数为土坝，属于整体强度较低、建材相对松散的坝型。由于投资较少、材料构成复杂、施工要求较低，小型土坝在全球范围内的病害、险况、溃决都高居各种坝型的榜首，缺乏有效监测和安全鉴定，显然是导致诸多溃坝灾难的重要原因。目前，全国仍有病险水库大坝 4 万多座亟待处理，为了充分发挥工程效益、确保安全运行，加强大坝运行监测、定期进行安全鉴定、及时施行除险加固都尤为重要。

自 2003 年国家水利部颁布《水库大坝安全鉴定办法》以来，国家和各级

地方政府每年都筹集数百亿元专项资金，用于大坝的安全鉴定及除险加固工作。长期的市场和巨量的项目，使相关的企事业单位亟须工程检测、分析鉴定以及加固设计等专门人才，造成具备相关知识和技能的专业人士供不应求。然而，在土石坝运行的安全鉴定和除险加固过程中，出现了较多的谬误和缺憾，因此依据相关标准和规范，整合著者三十余年的科研成果和工程实践经验，撰写这本专业书籍，以期提供较为系统、新颖的工程观念。

本书由昆明理工大学的杨华舒教授、博导，以及符必昌、黄继伟、陈刚、王毅、胡应庭等副教授/高级工程师/博士合著。与本专著相关的专项研究工作得到了国家自然科学基金（50869003、51069003、41462013），云南省应用基础研究计划重点项目（2013FA033），云南省自然科学基金（1991E016Q、1995YI016、1997E047M、2010ZC048），以及云南省教育厅（10968221、10978057）、昆明理工大学创新团队（14098193）、精品课程（10968137）等多次立项资助；较多研究成果已在《岩土工程学报》《岩石力学与工程学报》《建筑材料学报》《水力发电学报》、*Advanced Materials Research*、*Applied Mechanics and Materials* 等国内外权威期刊上发表，并被 SCI、EI 等国际著名检索机构收录；《工程检测与大坝安全》已被审定为“十二五”重点规划教材。本书的相关工作还得到了云南省水利厅，以及云南省各州市县水利水务部门的大力支持，特致谢忱。

限于水平，书中难免谬误和遗漏，恳盼读者不吝斧正。

目 录

前 言

第一章 土坝主要病险及防治的研究进展	1
1.1 坝顶漫溢	1
1.2 异常渗流	6
1.3 坝坡及库岸的险况	9
第二章 红土堤坝的病害机理研究	13
2.1 母岩的风化去硅过程	14
2.2 红土化过程与土坝病害的关系	15
2.3 红土大坝的细观劣化机理	15
2.4 现有防渗措施的分析	27
2.5 红土堤坝劣化的研究结论	29
第三章 红土的成分与工程指标的关系	31
3.1 研究内容和基本条件	31
3.2 酸侵蚀红土的加速寿命试验	32
3.3 碱侵蚀红土的加速寿命试验	39
3.4 加速寿命试验的成果归纳	45
3.5 受蚀红土的物质劣化机理	45
3.6 受蚀红土的工程指标劣化机理	47
3.7 工程指标与受损物质的量化关系	50
第四章 小型钢闸门的安全检测	68
4.1 测试分析依据	69
4.2 测试原理与实施步骤	71
4.3 应力检测与计算方案	72
4.4 启闭设备的考核方案	75
4.5 检测及考核过程	76

4.6 检测的可靠性及其结论	83
第五章 内置土工膜的破损定位方法	86
5.1 光纤与堤坝主材的亲合性	86
5.2 膜—土联合抗震研究	97
5.3 光纤土工膜防渗的监测设计	103
5.4 分布式光纤测温定位的研究	106
5.5 分布式光纤应变定位研究	122
5.6 温度、应变联合定位的探讨	125
5.7 本章的研究成果	128
第六章 土坝安全鉴定的资料与分析	130
6.1 资料来源	130
6.2 现场踏勘	132
6.3 工程质量与管理状况	135
6.4 土坝运行的安全复核	136
6.5 大坝安全的综合鉴定	143
第七章 土坝安全鉴定的原型实践	144
7.1 库区工程及其病害简述	144
7.2 现场检查	158
7.3 工程质量评价	162
7.4 大坝运行管理评价	166
7.5 防洪标准复核	171
7.6 结构安全评价	187
7.7 渗流安全评价	192
7.8 抗震安全复核	196
7.9 金属结构安全评价	199
7.10 大坝安全鉴定	201
参考文献	212

第一章 土坝主要病险及防治的研究进展

影响大坝安全运行的因素可分为水情、变形、渗流、应力 4 大类别。土坝的险况主要有坝顶漫溢、渗透破坏、坝坡滑塌这 3 种类型^{[1]~[18]}。本章以土坝的险情为索引，综述对各种病害的研究现状。

多年来，国际国内的许多学者都对溃坝案例进行了收集，并开展了相应的研究。国际大坝委员会（International Commission on Large Dams）曾经分别于 1973 年和 1983 年在法国巴黎发表了 1965 年之前的数百个溃坝案例。1975 年和 1988 年，美国大坝委员会（United States Committee on Large Dams）在纽约公布了 199 座溃坝事故的调查报告。布莱恩德（Blind H.）、沃格尔（Vogel A.）等分别对各种溃坝案例进行了分析，里科（Rico M.）等针对近二百座溃坝的尾矿坝进行了研究，Foster M. 等对管涌和坝坡失稳进行了侧重探讨。

1954 年以来，我国对溃坝事故进行了 3 次统计。迄今为止，全国已经发生大坝溃决事故 3515 次，其中小型土石坝的溃坝占比逾 98%。张利民等（2007）建立了国外溃坝案例数据库，收集了 56 个国家和地区的 1609 个溃坝案例。张秀玲（1992）和李君纯（1996）等对溃坝案例进行了分析。李雷等（2006）研究了大坝溃坝的机理。严祖文等（2011）分析了溃坝的主要原因。何晓燕等（2008）收集了 1991~2003 年的溃坝事故情况并对溃坝率与气候特征的关系进行了初步探讨。

1.1 坝顶漫溢

对于土坝而言，坝顶漫溢是溃坝的最主要诱因，必须进行紧急处理。导致坝顶出现漫溢险情的因素可分为 3 类，分别是：洪水超标、坝高偏低、泄洪故障^[3,4]。

1.1.1 洪水超标

出现超标洪水的主要原因是，对各等级洪水的重现频率、洪峰流量、标准时段内的洪水总量等预测尚不够准确。近年来，针对洪水预测及调度领域的研究热点，主要集中在以下 4 个方面。

1.1.1.1 洪水推算方法的完善

对各时段流速、水量的计算误差,直接导致了洪水分析成果的缺憾。在此方面较有代表性的研究包括:吴晓玲等(2008)针对洪水预报中糙率的实时修正问题,采用卡尔曼滤波技术实现动量方程实时校正糙率,同时考虑河道下游糙率对上游水深的影响,以提高水动力学模型的洪水预报精度^[19]。包红军等(2012)建立了基于卡尔曼(Kalman)滤波理论的河道糙率反演模型,将河道不规则断面沿程概化为矩形、三角形和抛物线形断面,引入水力半径与水深的经验关系,基于圣维南方程组动量方程中惯性项与弗洛德数相关性,推求水深对糙率的偏导数,建立基于 Kalman 滤波理论的平原区河道糙率反演模型^[20]。滕济端(2014)采用以水位涨率为参数的相应水位法进行洪水预报,精度达到了相关要求^[21]。张驰(2014)提出了一种洪水演进数值模拟计算中网格流出率的修正方法,通过修正系数对负水深网格进行修正,获得该网格的实际水深,当出现水面标高低于地面标高时,使洪水演进数值模拟计算得以顺利进行^[22]。姜传勇等(2013)以武江流域为例,分析了年最大洪峰流量的变化,对环境变化前后分别进行了超定量频率分析和风险率计算,并对洪峰变化做了分析讨论^[23]。江平(2009)利用中国洪水预报系统平台和三水源新安江模型,对丰良河的棠荆水文站小流域洪水进行参数率定,并对率定结果进行了分析,采用合理的方法对参数进行人工调试,确定适合该小流域洪水特征参数,增加了模型洪水计算的拟合度^[24]。

1.1.1.2 洪水调度方案的研究

汛期水库运行的合理调度,是保证土坝安全并尽可能存留库水的关键环节。范子武等(2009)在对短期水文预报不确定性分析的基础上,提出了将洪水预报精度等级评定指标转化为入库洪水过程的随机特征值的方法。他们利用水库调洪演算的随机微分方程,分析了不同预报精度等级和不同预见期条件下水文预报误差的传递与演化过程,并建立了水库汛限水位动态控制的风险率计算模型,以定量评估抬高汛限水位对水库大坝和下游河道防洪安全的影响^[25]。刁艳芳等(2011)分析了水库防洪预报调度中不确定性因素的随机性、模糊性及灰色性,并在已有的防洪预报调度方式随机风险率计算方法的基础上,提出了随机—模糊、随机—灰色及综合特性风险率的计算方法,研究了水库实施防洪预报调度方式相对于常规调度方式水库风险率的变化^[26]。穆锦斌等(2010)着重讨论了建模过程中有关断面资料处理、阻力问题和内外边界条件给定的问题。采用实测资料对模型进行率定与验证,并对荆江特大洪水进行了模拟调度^[27]。洪国艳等(2009)考虑了漫坝风险的水力不确定性因素,通过建立 MC 分析模式,对柘林水库动态控制汛限水位对水力风险率的影响进行了研究,认为提高汛限水位会加大漫坝概率^[28]。

1.1.1.3 测算防洪能力及溃坝洪水

Kuo J T. 等(2007)研究了漫坝风险和采用可靠度分析的方法^[29]; Cheng S T. (1982)考虑了水文和水力的不确定性,对漫坝风险进行了估算^[30]。黄淑芳等(2010)考虑堤顶高程和风浪的随机不确定性,采用 JC 法对各随机变量进行正态化,计算了堤防漫顶风险

率,并得出洪水频率与漫顶风险率之间的关系^[31];孙颖等(2005)综合考虑洪水、风浪、库容和泄水能力的不确定性,建立了土石坝对抗洪水和风浪联合作用的漫坝风险模型^[32]。姜树海(1998)构建了大坝溃决的随机模糊分析模型^[33];胡朝阳等(2012)针对城市河道由自然渠化生态的过程导致河槽糙率变化问题,分析其对河道行洪能力的影响,并利用一维河网模型 MIKE11 建立了海城河城区段水动力模型,分析生态河道规划前后不同糙率情况下海城河现状堤防的防洪能力^[34]。姚志坚等(2008)提出了用等效糙率模拟建筑群的方法及等效糙率取值的水槽试验手段,并应用于溃坝洪水的演进研究中^[35]。

1.1.1.4 对降水和径流的研究

李兰等(2013)借鉴水文学中流域土壤最大蓄水量计算方法,利用历史旱涝灾情资料,在考虑流域分水岭、地形、气候分区三要素基础上,将湖北省进行分区,分别计算了各区域的洪涝临界雨量。认为当河流出现极低水位时,临界雨量会相对增大^[36]。简虹等(2011)以 Mann-Kendall 法和小波分析为主要研究方法,分析了沙坪坝区的降水变化特征^[37]。宫永伟等(2012)选用 SWMM、Mike Urban 和 InfoWorks ICM 这 3 种模型模拟了降雨径流情况。认为各模型间均存在正相关,且都达到极显著水平;当利用模型模拟研究区域时,有必要对参数进行率定和验证^[38]。

1.1.2 坝高偏低

土坝的设计坝高由特征水位、波浪爬高、风壅水高、安全超高、地震的涌浪及沉陷超高构成。其中,正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位等特征水位,分别由兴利库容或调洪演算决定;安全超高、地震涌浪高按设计规范取值;对于小型水库而言,风壅水面增高的值很小^[3,4]。故该邻域的研究热点主要集中在波浪爬高、沉陷超高方面。

1.1.2.1 波浪对坝高的影响

为了节约投资,许多小型土坝的坝体高度仅依据汛期的特征静水位设计,而将较小的波浪等动水带来的漫溢风险交给放浪墙承担,因此浪高的计算精度对坝顶高程具有显著影响。近期较有代表性的相关研究包括:蔡联华等(2013)通过对莆田、鹤地、官厅 3 公式的平均波高、平均波长和平均波浪爬高计算成果,及其与风区长度的关系曲线进行分析研究,探讨了 3 公式计算结果之异同及其特点^[39];郭丽玲等(2006)结合现行规范和经验,讨论了波浪要素的确定方法^[40]。祝春姬等(2008)分析了削浪墙的减浪作用^[41];魏珂等(2013)提出了在上游坝面设置梅花形的反弧对冲消浪墩的消浪方式,通过波浪的折射和对冲,使波浪损失大部分动能,从而降低波浪爬高^[42]。张明亮等(2012)基于浅水方程(SWE)和扩展的 Boussinesq 方程建立了一维溃坝波演变及波浪爬坡的显格式数学模型。模型采用有限体积法离散方程和应用带有四阶精度的 HLL 格式的近似 Riemann 解计算界面的通量,能够捕捉干湿界面的动边界问题,在计算中静水压力被放入源项中,摩阻项和植物拖曳力项采用隐式离散的方法来增加计算的稳定性。采用建立的数学模型对溃坝波越过三角障碍物、溃坝波爬坡及无植物和带有植物的孤立波爬坡等典型算例进行了模拟^[43]。

黄锦林 (2011) 研究库岸滑坡涌浪对坝体的影响, 对滑速垂直条分算法提出了改进算式, 讨论了滑坡体滑速、水位与涌浪的关系, 提出了涌浪压力的计算模型^[44]; 李仰波等 (2009) 根据坝岸涌浪预测的相关经验公式, 对可能出现的涌浪高度进行了分析和评价^[45]。

1.1.2.2 土坝的固结与沉降

对坝体及坝基的长期沉降量估算失误, 是导致坝顶漫溢的重要原因。曹雪山等 (2009) 针对心墙土在初次蓄水前为饱和度高于 80% 的非饱和土, 提出了固结简化计算的有效应力分析方法, 可反映孔隙中气体对水压上升的影响^[46]。齐清兰等 (2005) 分别推导出了以超孔隙水压力和孔隙比的控制变量的有限应变固结微分方程, 采用渗透诱发固结试验得到微分方程的参数变量, 并以此为依据求出了微分方程的数值解^[47]; 沈永福 (2000) 根据各土层分期固结的特点, 依据分层总和法和固结沉降的基本概念, 提出了分期固结的计算方法^[48]。王永亮 (2001) 通过对 7 座大型水库上坝的沉降观测资料进行统计回归, 分析了对数及双曲线形式统计模型的适用范围, 并对模型中参数的选取进行了探讨^[49]; 王润生 (2012) 运用三维有限元仿真技术, 模拟计算了均质土坝的沉降过程^[50]。刘东海等 (2014) 建立了考虑各坝料分区和实际压实质量的土石坝施工期沉降预测回归模型, 并利用遗传和声算法对模型的回归系数进行寻优重估, 以提高模型的精度^[51]; 沈毅等 (2014) 用实测数据拟合构造 GM (1, 1) 灰色模型, 对模型进行了考虑不同数据对沉降预测结果有不同影响的加权改进, 并利用指数函数变换来提高原始数据光滑度^[52]; 蓝善勇等 (2012) 针对传统回归模型的不足, 提出采用逻辑回归曲线建立土石坝沉降预测模型, 由最小二乘法确定模型参数^[53]; 黄铭等 (2004) 从遗传蠕变理论出发, 将监测模型分解为确定部分和统计部分, 组合形成混合模型, 模型考虑了填筑进程及材料蠕变特性对沉降的影响, 在有限元基础上建立沉降填筑确定模型部分, 采用遗传蠕变思想构造能体现填筑进程影响的统计因子, 以回归计算求解参数建立混合模型^[54]; 姜景山等 (2004) 运用遗传算法基本原理, 以时效量作为基本影响因子, 建立了土石坝沉降的遗传算法模型, 对基本遗传算法加以改进, 决策变量采用算术交叉算子和均匀变异算子, 从优化模型和土石坝沉降规律出发确定决策变量的定义域^[55]; 刘国华等 (2003) 采用自适应多变量灰色模型来预测土石坝沉降, 其参数能够反映工程中多个变量间的相互影响、相互制约关系^[56]; Yong Seong Kim 等 (2008) 将神经网络 (ANN) 用于淤泥坝的坝顶沉降的预测^[57]。

1.1.3 泄洪故障

除了对洪水预测失误、坝高达不到相关要求之外, 泄洪设施的故障也是造成土坝漫溢甚至溃坝的重要原因。泄洪故障主要体现在过流能力不足、泄洪结构 (及闸门) 的可靠性差这两个方面^[3,4]。

1.1.3.1 泄洪能力

孔口或溢洪道的实际过流能力若低于设计值, 将直接导致坝前的水位上涨失去控制,

或者溢出冲刷下游坝坡。近年来较有代表性的研究包括：唐新军等（2007）通过试验研究了曲线形堰的泄槽水面线起算水深，发现圆弧曲线堰及翼形堰的起算水深均小于 0.7 倍临界水深；认为掺气挑坎对水流的扰动和挑流作用，使得泄槽内的水深增大，掺气挑坎对水面线的影响程度与流速、掺气挑坎的体型等因素有关^[58]。鄂丽华（2004）提出将多因素、多层次模糊优选理论引入溢洪道的设计选型工作中，引入因素的优先关系法来确定优选矩阵的隶属度，以期减少确定隶属函数的人为影响^[59]。罗岸等（2003）通过水工模型试验研究，探索了试验与计算相结合，求解各组闸门混合开启时闸孔泄流能力的方法^[60]。陆晓如（2007）本文利用相关分析方法研究了部分闸孔开启时流量系数的影响因素，提出多孔闸孔口淹没出流时，综合流量系数不仅与相对淹没度有关，还与下游水流扩散情况有关^[61]。李国斌等（2006）分析比较了韩国和中国的平底闸堰流、孔口流，提出流量计算中应考虑闸前行近流速水头的影响^[62]。尚昆等（2003）通过模型试验和理论计算得到了孔流与堰流的关系式，并推广到闸门控制泄流上^[63]。F. Lemperiere 等（2002）介绍了迷宫堰（Labyrinth weir），其溢流前沿比一般的直线堰增长几倍乃至十几倍，因而其溢流能力比直线堰大得多^[64]。

1.1.3.2 泄洪结构

设计失误或结构损伤均可造成泄洪异常，轻者影响泄洪能力，或者渗漏影响坝体稳定，重则因无法泄洪而导致坝顶漫溢。魏祖涛等（2011）通过对溢洪道泄槽底板的稳定分析，得出锚筋的数量和长度与其受力的关系，对泄槽底板实现多层水平锚筋加固^[65]。杨京等（2007）发现当泄槽设置多道掺气挑坎时，由于掺气挑坎对水流的扰动影响，使得泄槽底板上的动水压强分布极不规则，作用于泄槽底板上动水压力的模型试验实测值与计算值相差较大，并随底板在泄槽中所处的位置而变化；根据模型试验实测值与计算值的对比，提出了计算底板动水压力时的修正建议^[66]。海彬等（2009）利用钻孔灌注桩来处理溢洪道反弧段下的深厚软弱地基，根据其反弧段和钻孔灌注桩的受力情况，通过对深厚软基上溢洪道泄槽末端反弧段进行稳定分析，得出了基桩的承载力、长度与其所受各力之间的关系和稳定安全系数表达式^[67]。马铁成等（2008）利用蒙特卡洛法计算了考虑滑动面的脉动压力、渗流压力、水流拖曳力、堆石体内摩擦角等不确定性时的抗滑稳定风险，认为溢洪道底板抗滑稳定性分析中，忽略随机性的安全系数存在风险^[68]。B. X. 达夫列特申等（2002）采用数学模型对冲刷过程中建筑物初始断面变化动态、破坏断面的冲刷特性和初始龙口扩大动态进行了试验研究及计算，认为龙口溢流可能会对土坝和土堤造成毁灭性破坏^[69]。张平等（2003）采取特有的裂缝单元模拟裂缝中骑缝筋，对溢洪道的闸墩裂缝危害性及处理措施进行了数值分析，较好地模拟了裂缝在外荷载下的变形及裂缝中钢筋的受力状态^[70]。杨华舒等（2003）通过对闸门的现场检测，分析了门叶各构件在全闭档水和启闭运动时的应力状况，对于闸门长期存在的病害提出了较为合理的成因解释，给出了闸门整体性能和运行现状的评价方法以及对应的治理建议^[71]。

1.2 异常渗流

异常渗流不仅损失了大量的水资源,伴随的渗透破坏更是导致土坝溃塌的主要元凶。异常渗流和渗透破坏均存在明显的发生和蔓延过程,只要弄清了病害的原因并及时进行有针对性的加固,就完全能够阻止险情的发展。近年来,关于土坝渗流的研究热点主要集中在4个方面^[1,2]:渗透破坏机理、防渗加固技术、渗流分析与控制、渗流监测技术。

1.2.1 渗透破坏机理

全球范围内均有大量土坝出现过防渗加固的失误,主要是渗漏诱因不明,或者加固材料不适合造成的,因此对破坏机理的研究将显著加强修复技术的针对性。在此领域较有代表性的研究包括:杨华舒等(2012)基于材料互损的化学分析,设计了红土坝料的加速劣化浸泡,对比试验了水工指标,分析了渗水的离子浓度变化。认为碱性物质降低了倍半氧化物的聚合力、消耗了红土的黏结成分、劣化了结构材料的颗粒级配,指出材料互损是导致土坝重要指标逐渐劣化、细观渗流通道增加扩大、加固效益太低的重要原因之一^[5,6]。李守德等(2005)在探讨均质土坝管涌发展过程模拟方法的基础上,提出以一维通道嵌入三维块体的方法,使用数值方法分析了土坝管涌发展过程的渗流场时空分布特性,提出了管涌发展过程中渗流力集中状况及其变化规律^[72]。陈晓平等(2004)基于多孔介质的渗流特性和土的非线性本构关系,研究了渗流场与应力场的耦合效应,认为渗流与应力的相互作用是不应忽视的,其作用结果将会使土坝、特别是防渗心端附近应力水平和渗透坡降均有不同程度的提高,耦合作用对土坝的安全不利^[73]。徐杨军等(2011)对库水位下降过程中的饱和—非饱和土坝进行了数值模拟分析,表明由于非饱和区的存在,坝体中的自由水面的形态呈上凸状,且孔隙水压力消散速度变缓^[74]。魏海等(2008)利用概率与统计的方法对土坝渗透稳定进行可靠性分析,考虑了坝体材料等一些不确定因素对土坝的渗透稳定影响。提出坝体渗透破坏的概率随土体有效重度和内摩擦角变异性而增大,并且土体内摩擦角及渗透变异性对坝体渗透破坏的影响较大^[75]。郑贞宝等(2009)利用原子吸收法和X-荧光光谱分析法,对渗水及析出物进行了化学成分分析,认为在渗流过程中的渗水引起了化学潜蚀,潜蚀作用与坝体及坝基的材料性质密切相关^[76]。陈生水等(2012)通过分析土体颗粒在渗透通道中的受力情况,得出了渗透破坏发生时的临界起动流速,提出了反映土石坝渗透破坏溃决机理、描述渗透通道发展到坝体坍塌全过程的数值模拟方法^[77]。

1.2.2 防渗加固技术

近年来,在土坝的防渗加固技术范畴,研究热点主要集中在完善现有工艺、研发新材料方面。

在内嵌土工膜防渗领域:杨华舒等(2014)发明了光纤土工膜并获准3项专利权,解

决了内嵌土工膜破损定位的难题;结合红土坝坡进行了剪切强度试验和可调斜坡模型的抗滑试验,获得了各种工况组合下,膜—土界面的黏聚力、摩擦角、滑动坡比、摩擦系数等等数据^[2,8,15~17]。邢玉玲等(2007)应用FLAC3D软件对土坝的应力应变和渗流进行了数值模拟,认为土工膜与土心墙组成的联合防渗系统可大大降低心墙浸润面,有效削弱心墙拱效应,完全消除了心墙大主应力小于同高程渗透水压力的现象^[78]。花加凤等(2007)用力学平衡法对土工膜的受力及与坝体的相对位移进行计算,用FLAC3D软件对整个坝体及坝面上的膜进行仿真数值模拟,提出了坝体与岸坡及坝基锚固处的土工膜存在夹具效应,且坝体与岸坡锚固处膜中的夹具效应比坝体与坝基锚固处明显^[79]。姜海波(2011)采用试验研究、有限元数值计算和理论分析3种方法,对坝体、坝基和库区土工膜防渗体的力学特性和渗透系数进行了较为系统的研究,分别讨论了土工膜的应力集中现象、变形规律以及渗流边界条件,并计算了复合土工膜坝的孔隙水压力,分析了土工膜防渗体的抗滑稳定性^[80]。张红等(2006)总结了复合土工膜应用中的设计计算、效果、效益,提出了复合土工膜在土坝除险加固工程中应用的要点^[81]。束一鸣等(2009)通过三维数值计算得出膜周边锚固部位的相对位移,通过对应焊接试样的拉伸、剥离试验获得 σ - τ 关系曲线,通过锚固件的渗透试验证明了锚固工艺的可靠性,通过对膜复合工艺的改造来满足坝轴线弯曲段复合膜的拼接、铺设平顺要求^[82]。

在灌浆防渗方面:王岳松(2006)分析了劈裂灌浆中主浆脉不明显的原因,提出了小型土坝劈裂灌浆应注意的几个事项^[83]。马军等(2012)阐述了高喷灌浆的施工设备、工艺流程、施工参数和施工方法^[84]。王惠民(2013)讨论了高压旋喷灌浆的机理及在运用中的工艺,针对不回浆和串浆的现象,分析了原因并提出了解决措施和建议^[85]。周忠明(2009)探讨了在土坝地基防渗中采用三重管旋喷法的施工工艺^[86]。陈正茂等(2011)介绍了高压摆喷防渗的设计过程,并根据现场试验拟定了各参数的最优组合^[87]。卢祖贵(2011)针对土坝较高部位的涵洞加固难题,采用高喷灌浆技术,通过精确布孔并对各种喷射进行组合、调节喷嘴方向,达到了相关的防渗质量要求^[88]。

在防渗墙领域:杨令强等(2007)采用Duncan-Chang E-B模型描述土的非线性特性,以接触单元模拟防渗墙和土石坝之间的相互作用,利用非线性有限元程序计算了土石坝和防渗墙的应力和变形。认为刚性防渗墙对垂直沉降的制约作用明显,柔性防渗墙适应变形的能力强、但对位移的影响较大^[89]。姚汝方(2009)对坝防渗的墙混凝土性能进行了试验研究,采用粗颗粒低热水泥、高性能减水剂和引气剂以及掺40%质量分数的粉煤灰,配制出了高强度、低弹性模量且工作性能优良的防渗墙混凝土,早期强度增长非常缓慢^[90]。张成军等(2005)的研究表明,黏粒含量较高的黏土对降低混凝土弹性模量效果显著,并使混凝土具有相对较高的强度和抗渗性能;黏土混凝土抗压强度随龄期增长系数与普通混凝土在7d时基本一致,90d则明显高于普通混凝土;与28d相比,黏土混凝土90d弹性模量增长很少,但抗渗性能约提高了5倍^[91]。张昀青等(2004)掺加粉煤灰、膨润土、黏土和外加剂等掺和料,采用正交试验的方法,分析了各材料对混凝土性能的影响,提出了防渗心墙材料的最佳配合比及混凝土成型后的性能测试指标^[92]。毛海涛等(2008)采用

保角变换的方法,推导出无限深透水地基上土石坝的坝基渗流量和下游出逸坡降公式,分析了垂直防渗墙位置变化与坝基渗流的关系^[93]。朱晟等(2009)利用基于免疫学原理的遗传算法与有限元计算理论,提出了土石坝力学特性参数的反演分析法,并对心墙沥青混凝土的 Duncan 参数进行了计算分析^[94]。

1.2.3 渗流的分析和预测

对渗流状态进行分析,有助于了解坝基和坝体中的流场分布,并可预测浸润线的变化,为渗流量和渗透破坏的量化计算提供依据。近年来较有代表性的研究包括:牛文杰等(2007)根据达西定律和渗流连续方程建立了不透水地基上均质土坝的渗流模型,采用有限元离散的方法计算了土坝的渗流自由面,并分析了在不同的渗透系数情况下自由面位置的差异^[95]。王民侠等(2009)用 $k/\mu v$ 表示库水位相对于渗流自由面下降的速度,以量化区别库水位是缓降、快降还是骤降,采用计算和查表对比的方法确定给水度 μ 的值,并用不同算式计算了水位降速的阈值^[96]。周建国等(2006)根据蓄水过程和地质、结构特点,建立了饱和一非饱和非稳定渗流的计算模型,采用三维有限元方法模拟了坝址区地下水位与水库蓄水过程的对应变化^[97]。郑敏生等(2010)根据体积含水量曲线结合渗透性函数的估算方法,在考虑非饱和区的情况下,对均质土坝的稳态渗流、瞬态渗流进行了分析与比较^[98]。刘昌军等(2012)将无单元法应用于心墙土石坝的渗流分析中,编制了二维无单元模拟软件 LIDAREFM,利用该软件计算分析了心墙和堆石体渗透系数不同比值的渗流场分布^[99]。Abdelkader Djehiche 等(2008)针对排水系统缺乏渗流和浸润线位置控制的问题,基于均质土坝实验研究取得的成果,提出了在竖向排水体中对渗流量进行经济有效控制的方法^[100]。司春棣等(2007)在分析建模因子的基础上,利用支持向量机的结构风险最小化原则和遗传算法快速全局优化的特点,通过支持向量机模型对非线性监测数据进行拟合,并利用遗传算法优化支持向量机的模型参数,建立了基于 GA-SVM 的土石坝渗流监测模型^[101]。程伟平(2005)建立了土石坝动态的统计回归模型,通过分析模型的参数变化趋势,判断大坝的长期渗流是否趋于稳定,并以大坝综合渗透率是否随时间增大为标准,提出了监控大坝渗流稳定的临界水位^[102]。张乾飞等(2001)引入了库水位和降雨的滞后影响函数,建立了考虑滞后效应的大坝渗流监控模型,以便预报大坝的渗流状态^[103]。

1.2.4 渗流监测技术

渗流的分析和预测理论在边界条件界定、数值模拟简化等方面尚有较多缺憾难以克服,致使仿真和预测成果在实用中仍有较大的局限性。因此,渗流的原型监测迄今仍是各国土坝规范中的重要内容,也是研究的热点。杨华舒等(2014)检测了碱侵蚀红土渗透液中有效离子含量的变化,结合试验数据采用多元逐步回归分析法,提出了红土的滤出化学物质与渗透系数之间的关系式^[7]。刘海波等(2010)基于热传导与热对流原理,结合流体横掠管束传热准则,完善了渗流流速的光纤测读算式,借助拉曼散射测温效应找出坝体的温度异常区域,来确诊土坝内的细微管涌^[104]。金可礼等(2005)从系统结构、测点布