

高拱坝建设中的 重大工程技术问题研究

中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会 编著

GAOGONGBA JIANSHEZHONG DE
ZHONGDA GONGCHENG JISHU
WENTI YANJIU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高拱坝建设中的 重大工程技术问题研究

中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会 编著



内 容 提 要

本书为中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会主办、河海大学承办的“第一届全国高坝安全学术会议”论文集，共46篇。从总体上看，本书涉及水工结构、岩土工程、工程力学、水力学、材料科学等多个学科；从专业角度看，本书主要内容包括高拱坝的结构分析与试验的理论方法、泄洪消能与渗流、施工技术与管理、枢纽布置与坝工设计、安全监测等，展示了近年来高拱坝建设中的部分关键技术问题及研究成果，对今后的高拱坝建设具有一定的参考价值。

本书可供水利水电、地质、岩土、建筑工程、建设管理、安全监测等有关部门的规划、设计、施工、管理人员阅读，也可供相关专业的高校教师及科研单位的技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

高拱坝建设中的重大工程技术问题研究 / 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会编著. — 北京：中国水利水电出版社，2010.9
ISBN 978-7-5084-7921-7

I. ①高… II. ①中… III. ①高坝：拱坝—学术会议—文集 IV. ①TV642.4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第181407号

书 名	高拱坝建设中的重大工程技术问题研究
作 者	中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 21.25印张 504千字
版 次	2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	65.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着我国水电建设进程日益向纵深发展，水电站选址越来越转向水能资源丰富的西南深山峡谷地区，为了适应梯级蓄能需要、提高电能质量和取得较好的电站建设经济指标，高坝在一个流域的梯级规划中一般是必不可少的。而拱坝由于其对峡谷地形的适应性好，并可利用坝身泄洪等优点，成为在高坝选型中最具竞争力的坝型之一，得到了工程设计人员的肯定和广泛应用。

目前我国在建的 300m 级高拱坝有 3 座，拟建的有 2 座。已建和拟建的超过 200m 的高拱坝约 10 座。高坝的安全一直是水电水利界乃至全社会关注的焦点，在高坝的设计、施工和运行过程中，也不可避免地会碰到一些不同程度的技术难题，有关设计、科研单位和大专院校的专家对高坝尤其是高拱坝建设的关键技术问题进行了长期和卓有成效的研究工作，并取得丰硕成果。为了给水电工程界广大设计、施工、科研、建设单位和相关院校的研究与管理人员提供一个技术交流的平台，集中地展现近年来在高拱坝建设中取得的研究成果，中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会与河海大学合作，特别组织了“第一届全国高坝安全学术会议”，重点对高拱坝设计、施工和运行中的重大工程技术问题进行学术交流和探讨，以期对高拱坝建设的技术进步和运行安全有所裨益。

本次论文征集得到坝工界广大技术人员和专家的积极响应和大力支持，共收到论文稿件近 100 篇。专委会组织的专家和编辑人员对稿件进行了严格审查，共选用稿件 67 篇。文章内容广泛，涉及枢纽布置和坝工设计、结构分析与模型试验、泄洪消能与渗流、施工技术与管理、安全监测等多个方面。分别以中国水利水电出版社出版的论文集和《水力发电学报》专刊的形式发表。在此，特向所有论文作者和专家学者对本专委会工作的支持表示感谢。

中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会于2009年组织了以“利用覆盖层建坝”为主题的论文征集活动，并在三亚成功召开了学术交流会，取得良好效果。本次选择以“高拱坝设计、施工和运行中的重大工程技术问题”为主题开展学术交流。根据水工及水电站建筑物专业委员会的设想和安排，今后水工专委会年会将围绕高坝安全问题和其他典型的水工建筑物技术问题展开学术交流，希望广大学者和专委会成员继续支持和积极参与，为推动我国水利水电建设的科技进步作出贡献！

编者

2010年9月

目 录

序

前言

结构分析与试验的理论方法

小湾拱坝基于工程类比的安全度分析与评价·····	贾金生 段庆伟 吴永平 郑瑾莹	3
高拱坝整体稳定性分析的理论与方法·····	任青文	14
混凝土拱坝抗震安全问题·····	党林才 杜小凯 张 磊 唐 虎	21
库水—坝体抗震安全评价技术的现状及发展趋势·····	胡少伟	27
龙盘水电站高拱坝抗震安全初步研究·····	梁 晖 于火青 赵红敏	31
含贯穿裂缝的混凝土坝的地震响应分析·····	江守燕 杜成斌 洪永文	38
模拟爆破震动下三峡大坝的破损与安全分析 ·····	杜荣强 陈士海 章 青 邰筱林 韩金生 都 浩	44
溪洛渡拱坝基础缺陷处理及其对大坝工作 性态的影响·····	李同春 杨志刚 王仁坤	53
凤滩大坝变形特性及安全余度研究·····	何雷辉 徐宝松	59
考虑混凝土温度损伤的高拱坝施工期裂缝扩展稳定性分析·····	邵 勇 任旭华	66
水工混凝土双 K 损伤—断裂研究进展与展望 ·····	钟小青 胡少伟 陆 俊	72
混凝土水力劈裂指标的确定及其工程应用·····	姜亚洲 任青文 徐 炜	78
碾压混凝土高拱坝诱导缝开裂相似结构模型破坏试验研究 ·····	吕文龙 张 林 胡成秋 杨庚鑫 常承亮	85
地质力学模型试验在高拱坝整体稳定分析中的应用·····	姜小兰 陈 进 孙绍文	92
万家口子高碾压混凝土拱坝温控仿真与结构分缝研究·····	李通盛 常晓林 周 伟	98
万家口子碾压混凝土双曲拱坝的拱座及坝肩稳定分析·····	伍杰添 姜清辉	106
云南万家口子水电站拱坝三维有限元静力分析·····	解凌飞 唐 浩 韩晓凤	112
重力坝坝基面抗滑稳定安全系数含义的探讨·····	徐建强	117
水工结构自主 CAE 软件开发的思考与实践 ·····	吴梦喜 何蕃民 杜 斌	127
基于重叠区域分解思想的有限元程序并行化研究·····	张 磊 杜小凯	136

泄洪消能与渗流

锦屏一级水电站泄洪设施布置及新技术应用·····	周 钟 游 湘 曾 勇	143
--------------------------	-------------	-----

大岗山水电站泄洪消能建筑物布置研究.....	黄 庆	黄彦昆	151	
立洲拱坝狭窄河谷表孔宽尾墩+深孔窄缝消能研究.....	赵继勇	邓 军	崔 进	157
万家口子高碾压混凝土拱坝泄洪消能研究.....	李布雳	盘春军	罗秉珠	162
水电站典型厂坝区渗流场分析探讨.....	吴梦喜	杨连枝	伍小玉	167

施 工 技 术 与 管 理

高寒偏远地区高拱坝混凝土掺和料选用研究·····	张 群	李海宽	李春红	177	
三里坪碾压混凝土双曲拱坝基础处理研究·····	向光红	龚道勇	杨晓红	182	
溪洛渡拱坝河床坝基固结灌浆项目管理实践·····			郑海益	187	
万家口子水电站施工总体设计·····	但汉仁	李 艺	唐景昌	李通盛	193
黄河拉西瓦水电站混凝土双曲拱坝工程施工·····	王裕彪	李 琪	赵海峰	201	
贵州构皮滩水电站拱坝施工工艺·····			周政国	212	
乌江构皮滩水电站大坝中孔闸墩 U 形无黏结预应力锚索施工工艺 ·····			周政国	李开玉	222

枢 纽 布 置 与 坝 工 设 计

拉西瓦水电站枢纽关键技术	李蒲健	233		
云龙河三级水电站碾压混凝土双曲薄拱坝设计				
孔凡辉	黄元	杨晓红	余昕卉	240
严寒地区超高拱坝设计的几点思考	张秀崧	刘万新	韩强	244
贵州清水河大花水水电站碾压混凝土双曲拱坝设计			陈宏	247
万家口子碾压混凝土拱坝设计	熊图耀	伍杰添	李通盛	254
万家口子碾压混凝土双曲拱坝的体型设计	伍杰添	熊图耀	李通盛	264
万家口子水电站高碾压混凝土拱坝的关键技术	李通盛	熊图耀	池为	269
浅议我国坝工建设的发展	翁义孟	277		

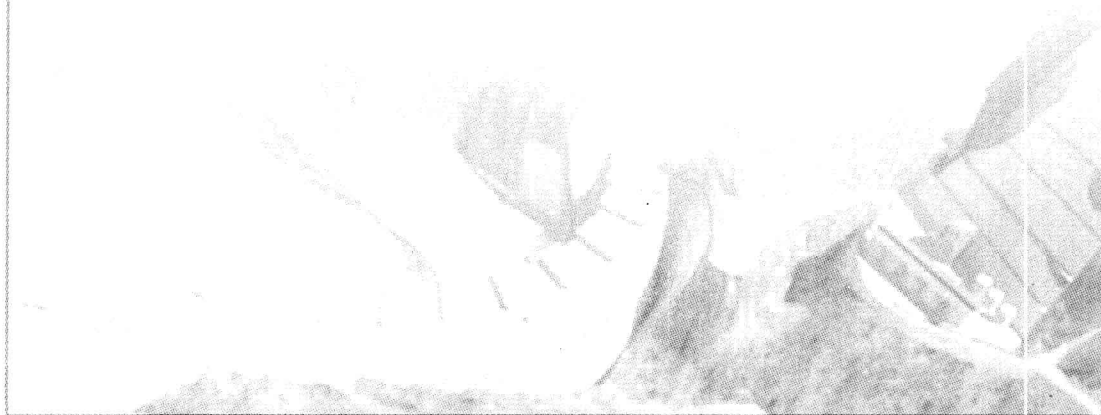
安 全 监 测

大坝安全监测新技术：欧洲的经验					
.....	Andrea DEL GROSSO	吴梦喜	Daniele INAUDI	Ivan COTTONE	285
基于无线传感器网络和卫星精密定位的高坝、结构健康监测研究					
.....				何秀凤 桑文刚	295
大坝变形实时监测的光电方法.....	霍宏发	文 潮	孙建华		300

其 他

心墙堆石坝水力劈裂风险分析·····	吴梦喜	韦 巍	何蕃民	伍小玉	307
土石坝心墙裂缝及其自愈合机理·····			张 亮	王俊杰	316
构皮滩水电站拱坝设计及初期运行综述·····	胡中平	曹去修	王志宏	段国学	321

结构分析与试验的 理论方法



小湾拱坝基于工程类比的安全度分析与评价

贾金生 段庆伟 吴永平 郑瑾莹

(中国水利水电科学研究院 北京 100044)

【摘要】 小湾水电站坝高 294.5m, 水推力达到 1900 万 t, 地形、地质条件非常复杂, 其安全评价办法没有现行的规范可依据, 本文详尽真实地模拟了小湾复杂地质结构和重要处理结构, 选择坝高级别相近或地形地质条件类似的已建工程为参考, 通过工程类比的分析方法, 确定合理的评价指标, 对小湾的承载能力和安全度进行评价。基于网格尺寸、材料模型、荷载考虑方式、考虑重点部位、计算软件和评价指标体系都相同的条件下, 以已建工程萨扬舒申斯克、Kolnrein、李家峡、石门、藤子沟作为类比研究对象, 通过数值模拟分析与对比, 确定了以坝踵开裂、帷幕裂穿、位移—超载系数关系曲线出现拐点、拱坝失去承载能力、坝体塑性屈服体积比和面抗剪安全度作为统一评价指标体系, 并通过相应的评价指标, 对小湾拱坝安全度进行了深入与系统地分析评价, 确定了小湾在 5 个拱坝工程中的相对准确的定位。

【关键词】 工程类比 高拱坝 拱坝安全度

1 引言

在水利水电工程领域, 拱坝与同等级别的重力坝相比, 以更能发挥坝基的承载能力、减少坝体混凝土方量、超载能力大等优势 and 特点而受到国内外坝工界的青睐, 全世界坝高 200m 以上的大坝有一半以上采用拱坝坝型。新中国成立以来, 我国的拱坝建设有了巨大的发展, 拱坝在世界上可能是最多的, 20 世纪 80 年代以来, 更向 200m 以上的高拱坝进军。与此相应, 有关技术如拱坝应力变形计算, 拱坝稳定分析, 拱坝动力分析和抗震, 拱坝温控、灌浆和地基处理, 拱坝优化等, 都取得了长足进步。随着西部大开发战略的逐步实施以及国家电力能源结构的调整, 西部 (特别是西南地区) 涌现出一大批已建和待建的高拱坝, 如已建成的二滩拱坝 (高 240m), 在建的澜沧江小湾拱坝 (高 294m), 黄河拉西瓦拱坝 (高 250m)、金沙江溪洛渡拱坝 (高 278m) 及雅砻江锦屏一级拱坝 (高 305m) 等。这些工程坝高都在 200m 以上, 坝基岩体地质条件相当复杂, 其设计和评价方法都是超规范的, 没有现成的依据可循。因此给拱坝的稳定分析和安全评价提出了许多挑战性难题。

对于高拱坝稳定和整体安全性评价目前常用方法有地质模型试验和数值模拟。通过拱坝正常蓄水位下坝肩、坝基及坝体内的应力和位移分布基本信息以及基于这两种基本信息

获得的具有物理和工程意义的指标，研究拱坝正常工作性态和可能存在的问题，同时通过拱坝的极限承载力的研究对拱坝的整体安全性进行评价。地质模型试验来指导拱坝设计是常用的有效方法，能够给人以拱坝变形和破坏机理的直观印象，但在高拱坝模型试验中，材料非线性影响非常重要，要使得成果反映真实情况，就必须考虑各种非线性影响，对于拱坝的破坏试验，就必须更加注重材料非线性的相似性模拟，而这一点是很难实现的。对于拱坝安全性评价，极限承载力的研究是一种主要方法，也是拱坝整体安全性评价中的一个重要指标，水荷载超容重方式是当前研究拱坝极限承载力的一种常用手段。模型试验和数值模拟通过分级不断加大作用在拱坝上游面的水荷载，直至拱坝最终丧失承载能力，研究拱坝在超载过程中位移、应力变化规律和裂缝（或塑性区）的扩展过程，通过拱坝系统的一些重要性态变化对应的超载系数评价拱坝的安全性。

小湾拱坝在设计和评价标准上显然是超规范的，没有规范可依。就同一个评价标准体系，还由于采用的计算方法的不同，得到的结论也时常不同，甚至完全相左，如三维应力变形超载分析中，即使都考虑了材料的非线性特性，采用 mohr—coulumb 屈服准则和 drucker—prager 屈服准则得到的超载系数就不相同，有时甚至能够相差 3.0 以上。因此对高拱坝整体安全度的分析评价，当前仅局限于工程自身进行系列指标分析是无法得到对工程的准确评价的，难免有些结论与真实情况有所偏离。超载法得到的超载系数反映了拱坝的超载能力或极限承载力，并通过超载分析发现坝体坝基整体系统可能存在的不易发现的工程问题和薄弱环节。但超载法并不总能真实反映拱坝的整体安全度，与其他的分析方法相互结合，采用多种指标的评价方法会更加完善。鉴于上述多种原因，本文试图通过工程类比的思路，将地质上或坝高级别上相接近的已建拱坝，与小湾拱坝进行类比，通过相同分析方法和相同的指标体系，得到小湾拱坝和类比工程在多个指标上的排序，结合类比工程在运行过程中的工程问题，对小湾拱坝的整体安全度进行客观评价，供有关专家和设计人员参考和借鉴。

2 小湾拱坝工程简介

小湾水电站位于云南省澜沧江中下游河段，是目前世界上建成的最高双曲拱坝，坝高 294.5m，水推力达到 1900 万 t，不仅坝高空前，承载的水推力巨大，而且两岸地形沟梁相间，山体内发育有近 EW 向（横河向）、近 SN 向（顺河向）两组近正交的陡倾角破裂结构面和一组缓倾河床的结构面，简称“两陡一缓”，在坝肩处分布有 SN 向延伸的高岭土化蚀变岩带。由于枢纽区地应力较高，坝基开挖后普遍存在应力松弛现象，尤其是河谷低高程部位更为突出，地质条件十分复杂。图 1 为小湾拱坝右岸岩体分区、断层和蚀变带分布示意图。小湾拱坝由于复杂的地质问题和坝高空前，多个工程问题受到专家的关注，亟待研究，如卸荷松弛岩体对拱坝的影响程度如何，坝肩抗力体地质缺陷如蚀变岩体、Ⅲ～Ⅴ级结构面、下游深沟的存在对拱坝影响如何，通过目前的处理措施后是否还存在隐患，小湾拱坝是否存在底部浅层抗滑不足问题，拱坝的整体安全度是否偏低，能否正常下闸蓄水，是否需要采取进一步的处理措施等。图 2 为小湾坝基卸荷松弛岩体示意图。由于篇幅有限，本文着重对小湾拱坝的浅层抗滑与整体安全度两个问题进行分析和探讨。

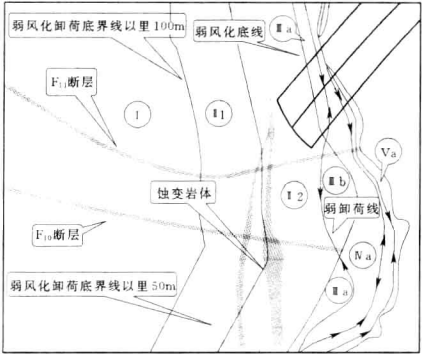


图 1 小湾拱坝右岸地质特征示意图

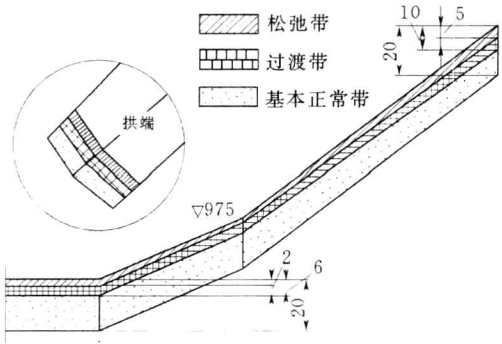


图 2 小湾坝基卸荷松弛岩体示意图 (单位: m)

3 类比工程选择依据与统一计算方法

3.1 类比工程的选择

在小湾拱坝类比分析中,以地质条件相似或坝高级别形同两条原则进行类比工程的选择。遵循上述两条原则,选择国内李家峡拱坝、石门拱坝、藤子沟拱坝,国外的萨扬拱坝、Kolnbrein 拱坝作为类比工程进行系统分析。图 3 为小湾及类比工程坝体拱冠剖面示意图。李家峡、石门、藤子沟拱坝在地质条件上和小湾具有较强的相似性,坝基中存在有缓倾的软弱夹层或软弱带,地形沟梁相间地形,萨扬和 Kolnbrein 拱坝都是坝高 200m 以上的拱坝,坝

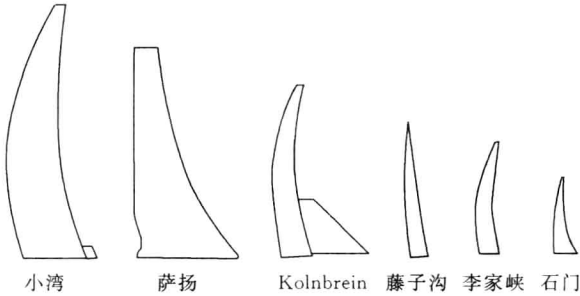


图 3 小湾及类比工程坝体拱冠剖面示意图

高级别与小湾接近。坝体体型特征参数和力学参数见表 1 和表 2。总体上李家峡和小湾拱坝地质条件最为复杂,石门拱坝次之,藤子沟、萨扬和 Kolnbrein 相对较好。为了使类比分析更加符合实际,对 5 个类比工程进行现场考察,对每个工程关注的工程问题及运行情况与拱坝设计师、地质师及运行管理单位进行充分交流,充分收集了类比工程的地质资料和运行期的监测资料。李家峡拱坝在河床部位存在有树枝状顺河断层 F_{20} 、 F_{20-1} 、 F_{50} 、与层间断层 f_{18} 、 f_{20} 、 f_{24} 交汇形成近 $500m^2$ 的断层与岩块相间的软弱岩区,对坝基变形、抗滑稳定及承载力有重要影响,左右坝肩的 f_{20} 断层、 f_{26} 断层对坝肩的稳定至关重要,在地质条件和主要工程问题与小湾非常相似,另外李家峡水电站还有自身的特点:左岸设有重力墩,山体三面临空,比较单薄。模型建立中着重考虑坝基软弱带以及层间挤压断层带对坝基抗滑稳定的影响,左岸主要考虑 F_{26} 、 F_{34} 、 $f_{18} \sim f_{24}$ 断层,右岸考虑 F_1 、 F_{27} 断层,河床考虑 F_{20} 、 F_{20-1} 、 F_{50} 断层;两岸考虑传力洞、置换洞和混凝土塞;左岸考虑重力墩、摸索及贴角;石门拱坝地形上为沟梁相间地形,地质上存在有“两陡一缓”裂隙或结果面组合,尤其是缓倾下游略偏右岸的一组裂隙对拱坝的浅层抗滑不利。石门拱坝 1975 年低温

季节水位为 615.7m 时运行中坝踵曾出现了拉裂缝（见文献《石门拱坝 25 年运行技术专题研究》第 28 页）；藤子沟拱坝与小湾的相似之处在于两岸坝肩和河床坝基都存在缓倾结构面，并且两岸山体都存在有顺河向的陡倾裂隙。萨扬和 Kolnbrein 拱坝的坝高都在 200m 以上，在运行中都曾出现了不同程度的工程问题，而后进行了加固处理，至今运行良好。以上类比工程为小湾拱坝的安全评价分析提供了宝贵的经验。

表 1 小湾及类比工程坝型特征参数

类 比 拱 坝	坝 高 (m)	坝顶弧长 (m)	最大底宽 (m)	弧高比	厚高比
小湾	294.5	892	73.12	3.029	0.248
萨扬	245	1066	110.75	4.35	0.452
Kolnbrein	200	626	37	3.13	0.185
李家峡	155	414	45	3.04	0.29
藤子沟	124	339	20.1	2.73	0.161
石门	88.6	254	27.3	2.867	0.308

表 2 小湾拱坝及类比工程水推力及坝体参数

类比拱坝	水推力 (万 t)	摩擦系数	黏聚力 (MPa)	类比拱坝	水推力 (万 t)	摩擦系数	黏聚力 (MPa)
小湾	1900	1.4	1.6	李家峡	242	1.0	2.5
萨扬	1530	1.5	2.0	藤子沟	131	1.1	3
Kolnbrein	876	1.3	4.0	石门	55.6	1.2	1.2

3.2 计算方法的统一

为了得到小湾拱坝承载能力和整体安全度在 5 个类比工程中准确定位，类比分析要做到以下几点的一致：评价指标体系和计算方法相同，荷载考虑方式相同，材料的本构关系和屈服模型相同，计算软件相同，以小湾拱坝所关注的工程问题考虑的重点相同，计算网格尺寸大致相同。

在收集的详细的地质资料基础上，对类比工程和小湾拱坝的岩体分区、坝址地形、地质断层、蚀变岩体、松弛岩体、软弱结构面以及工程的加固处理措施进行了详细模拟，以充分反映每个拱坝复杂坝基条件对拱坝整体安全性的影响。网格划分的尺寸在坝基附近和重点部位都控制在 2m 以内。对于类比工程，用收集到的运行期检测的坝基与坝体应力和变形资料进行的坝基和坝体参数的反演，并且对在运行中曾出现问题的拱坝进行重现。为使小湾拱坝和类比工程有很好的对比性，用同一套程序，从坝基自重应力场起始，依次模拟了筑坝、蓄水过程，考虑了坝基和坝体自重，水荷载以及温度荷载，用相同的水荷载超载方式和荷载增量级别进行了超载分析，根据相同的极限状态指标进行对比分析。

4 工程类比的评价方法

4.1 坝基浅层抗滑评价方法

小湾拱坝由于坝基的卸荷现象，尤其是在河床坝段卸荷岩体的强度明显偏低，因此小

湾拱坝的浅层抗滑对拱坝安全性是否产生隐患是特别值得关注的问题。小湾拱坝的浅层抗滑模式如图 4 所示,沿高程包络浅层抗滑组合面如图 5 所示。本文对拱坝在正常工作状态下,进行三维应力变形分析,得到沿坝基深度 2~5m 的松弛带的应力分布,采用面抗剪安全度指标,通过计算松弛带沿空间展布的面上的面抗剪安全度,分析和评价拱坝的浅层抗滑的安全性。由于拱坝的建基面是一复杂的空间组合面,坝基下游还有反倾上游的反倾面,因此关于面抗剪安全度的计算是非常复杂的。对于复杂的空间组合面上面抗剪安全度的计算,在理论上还没有非常严谨的计算方法,目前常用的方法有代数和方法方法和矢量和方法两种。

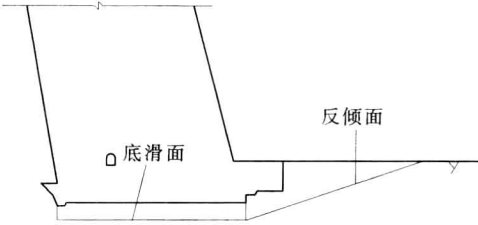


图 4 小湾浅层抗滑模式示意图

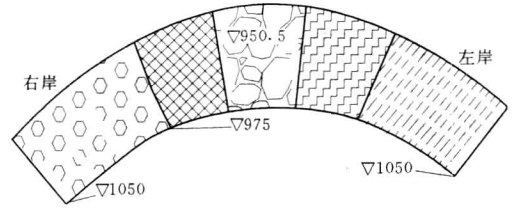


图 5 沿高程包络浅层抗滑组合面示意图 (单位: m)

代数和方法在计算纯摩面抗剪安全度时,采用的计算公式为

$$K_2 = \frac{\sum N f_2}{\sum T} \quad (1)$$

计算中不考虑面的滑动方向,把滑动力全部按代数和方法加起来,除面上的抗滑力得到的比值表示为组合面的面抗剪安全度。

矢量和方法在计算纯摩面抗剪安全度时,采用的计算公式为

$$F(\theta) = \frac{\sum R(\theta)}{\sum T(\theta)} \quad (2)$$

计算中考虑面的滑动方向,面的滑动方向 θ 由组成面的每个单元的滑动方向进行矢量求和而得到,面上的总滑动力为每个单元在该滑动方向上的矢量投影求和,最后去除面上抗滑力得到的比值表示为组合面的面抗剪安全度。

由于面抗剪安全度计算目前还没有更加严谨的合理的方法,本文在小湾拱坝浅层抗滑安全性评价上,除了分别采用上述两种方法外,还校核了小湾拱坝浅层向下游抗滑的安全性,即组合面的滑动方向沿顺河向指向下游。

4.2 拱坝极限承载力评价方法

对于拱坝的极限承载力分析,本文主要研究了拱坝在水荷载超载状态下拱坝的性态变化,为了便于类比评价分析,根据拱坝在超载过程中坝体出现的明显特征,将拱坝超载状态用 4 个特征指标进行定量的分析和评价。拱坝开始蓄水前,坝踵都处于受压状态,随着蓄水的升高或超载的增大,该处逐渐由受压向受拉转化,随着水荷载的进一步增大,坝踵的拉应力逐渐超过坝体的抗拉强度而出现拉裂缝,把拉应力超过抗拉强度引起坝踵处出现

拉裂缝的状态作为坝踵拉裂极限状态，对应的超载系数为 λ_1 ；随着超载的进一步增大，坝踵拉裂区进一步向帷幕处扩展，当拉裂缝接近于帷幕，还没有拉穿帷幕对应的拱坝状态称为帷幕安全极限状态，对应的超载系数为 λ_2 ；随着超载的进一步增加，坝体屈服区由最初仅在坝基附近出现，发展到坝体上部也出现大区域塑性区，坝体屈服体积突然增大，拱梁分载比例明显变化，坝体位移曲线出现拐点，此时拱坝状态称为拱坝破坏安全状态 λ_3 ；拱坝到达破坏安全状态后，还可以继续超载，直到坝体位移无限变大而出现计算不收敛，此时称为拱坝的整体溃决状态，对应的超载系数为 λ_4 。

5 小湾拱坝正常荷载下的变形分析

5.1 小湾拱坝模型

由于小湾拱坝地质条件的异常复杂性，为保证建立的拱坝模型全面真实的反映主要地质特征问题，同时还要满足计算硬件的要求，因此建立的模型在尽可能接近地质原型特征，并重点反映坝基（肩）变形稳定及抗滑稳定影响因素基础上，进行合理的简化。根据上述原则，建立的模型精确的模拟了 F_5 、 F_{10} 、 F_{11} 、 F_{20} 、 f_{12} 、 f_{19} 、 f_{34} 断层和 E_1 、 E_4 、 E_5 、 E_8 、 E_9 蚀变带及坝基松弛岩体，并精确模拟了坝肩混凝土洞塞置换传力结构和坝体上下游贴脚和诱导缝结构，如图 6 和图 7 所示。

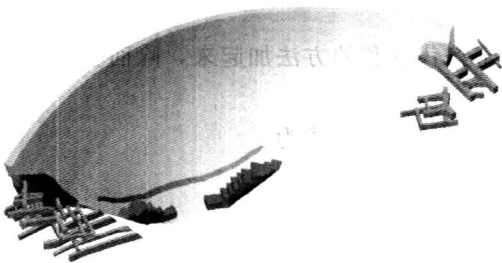


图 6 小湾拱坝洞塞和上下游贴角

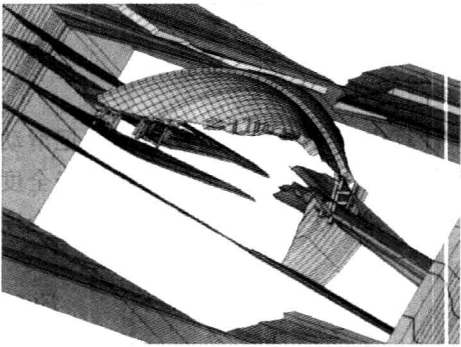


图 7 小湾模型中模拟的细部结构

建立的小湾拱坝整体模型如图 8 所示。模型底部高程到 650m，顶部高程到 1340m，左右边界由坝顶两坝肩分别向两侧延伸约坝顶弦长一半（约 800m），底部延伸一倍坝高。整体模型的高度为 690m，上下游长度为 735m，左右岸方向长度为 1700m。模型网格剖分总单元数 78 万个，总节点数 71 万个，以六面体单元为主，其他还有四面体单元和金字塔单元。在坝基和三带附近网格的边长控制在 2m 以内。仅坝体部分的单元有 19 万个，全部为六面体单元。

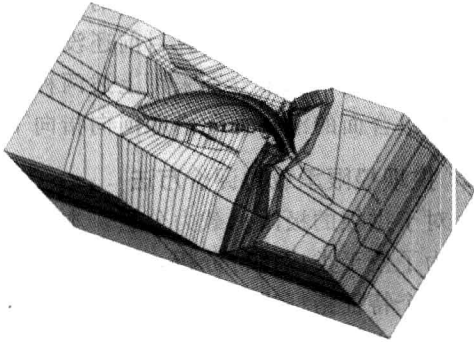


图 8 小湾拱坝整体模型

在正常荷载下的变形分析中，坝体采用线

弹性模型，坝基则采用弹塑性摩尔库伦屈服模型。

5.2 主要计算成果分析

小湾拱坝在正常蓄水位加温降荷载下，坝体产生的最大顺河向附加位移约 20cm（不包括筑坝产生的位移），位置在拱冠梁剖面坝顶处，图 9 为小湾拱坝拱冠梁剖面坝基屈服图。在消除由于贴角及诱导缝终止部位等几何突变因素引起的应力集中影响后，坝体最大拉应力出现在 1000m 高程左右拱端上游部位，约为 8MPa，以此为原点随着高程的升高和降低，拱端上游部位的拉应力逐渐减小，最大压应力则位于较低高程拱端和坝趾下游面附近，约为 12MPa 左右。拱冠梁剖面由于坝基软弱带的存在，其抗拉强度为零，以及拱坝

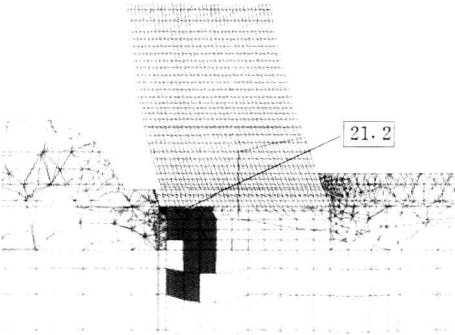


图 9 小湾拱坝拱冠梁剖面坝基屈服图
(单位：m)

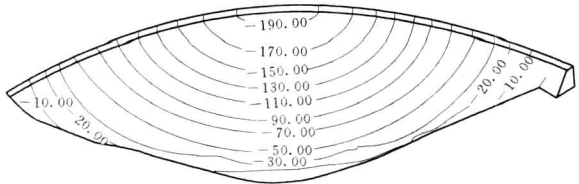
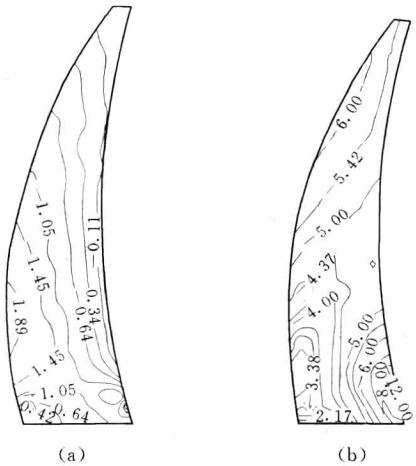


图 10 小湾拱坝下游面顺河位移等值线图
(单位：mm)

上游面诱导缝的作用，坝踵部位拉应力很小接近于零，在诱导缝观测廊道周边出现的最大拉应力约为 0.42MPa，坝趾处最大压应力为 12MPa，坝踵部位附近的松弛岩体出现一定范围的张拉屈服区，沿顺河向屈服深度约为 21.2m 左右，已达到了上游帷幕位置（坝踵处帷幕中心线距上游面距离为 22m）。

坝体拱端顺河向变位基本上从坝顶随着高程的降低，变位逐渐增大，方向朝向下游，坝顶拱端约 2~3mm 左右，坝体底部拱端约 12~13mm；拱端横河向变位最大值在高程 1090m 附近靠下游部位，方向指向两岸山里，约 10~12mm 左右，随高程向上和向下变化拱端横河向变位逐渐减小。拱端的竖向变位在下游部位全部指向重力方向，最大值出现在高程 1030~1110m 范围，约 9~11mm，上游部位在高程 1130m 以上指向重力方向，此高程以下则指向重力相反方向，在河床部位拱端最大竖向变位约 12~14mm。图 10、图 11 分别为小湾拱坝下游面顺河位移等值线图及拱冠深剖面主应力等值线图。



6 类比主要成果分析

6.1 浅层抗滑类比分析

小湾拱坝坝基的浅层抗滑最关注的是 2~5m 强卸荷带的面抗剪安全度的大小问题，为便于类比，在类比工程中统一对河床坝段建基面下 2m 处的面抗剪安全度进行计算，结果见表 3，其中萨扬、Kolnbrein 的结果没有计入扬压力作用，李家峡、石门和藤子沟的结果计入了扬压力的作用，小湾给出了计扬压力和不计扬压力两种情况。从表中看出，单比较建基面以下 2m 处面的面抗剪安全度，小湾和其他类比工程的面抗剪安全度都不是很高，尤其是纯摩面抗剪安全度在计入扬压力后都小于 1.0，小湾工程只是在几个类比工程中属于偏低的情况。

表 3 类比工程建基面下 2m 的面抗剪安全度

工程名称	纯摩面抗剪安全度	剪摩面抗剪安全度	备 注
小湾	1.037	1.173	不计扬压力，有限元 D—P 屈服准则
萨扬	1.431	2.185	
Kolnbrein（加固前）	1.202	2.045	
Kolnbrein（加固后）	1.523	2.892	
小湾	0.689	0.999	计扬压力，有限差分 M—C 屈服准则
李家峡	0.922	2.5	
石门	0.575	1.184	
藤子沟	0.957		

从几个类比工程的实际运行情况看出，李家峡和藤子沟拱坝在河床部位坝基都没有出现浅层滑动工程问题，萨扬、Kolnbrein 和石门拱坝在运行过程中曾坝踵部位出现了裂缝，但并没有出现浅层滑动，并且坝体经过局部加固处理，目前运行都很良好。另一方面，河床坝段建基面面抗剪安全度对于拱坝整个建基面来说仍是一个局部安全度，如果考虑的建基面范围逐渐向高高程扩大，通过计算得到，975m 高程以下建基面的纯摩面抗剪安全度增大到 0.769，1050m 高程以下建基面的纯摩面抗剪安全度增大到 1.352。由此看出拱坝与重力坝的本质不同，河床坝段浅层面抗剪安全度不足，对拱坝的整体安全度并不一定带来致命性影响。

6.2 极限承载力类比分析

小湾和 5 个类比工程的计算分析中，石门、藤子沟、李家峡采用了 FLAC—3D 有限差分程序，屈服准则为摩尔库仑屈服准则，萨扬、Kolnbrein 采用的是有限元程序，屈服准则为 D—P 外接圆屈服强度准则，小湾的超载分析则分别采用了以上两套计算方法进行分析。

从表 4 中的 λ_1 看出，小湾和类比工程，处藤子沟拱坝外，坝踵部位在正常蓄水位情况下都出现了程度不等的张拉屈服，从 λ_2 看出，萨扬、石门和加固前的 Kolnbrein 拱坝的张拉屈服区沿顺河向长度都超过了帷幕位置，这与 3 个工程在运行过程中曾出现的坝踵