



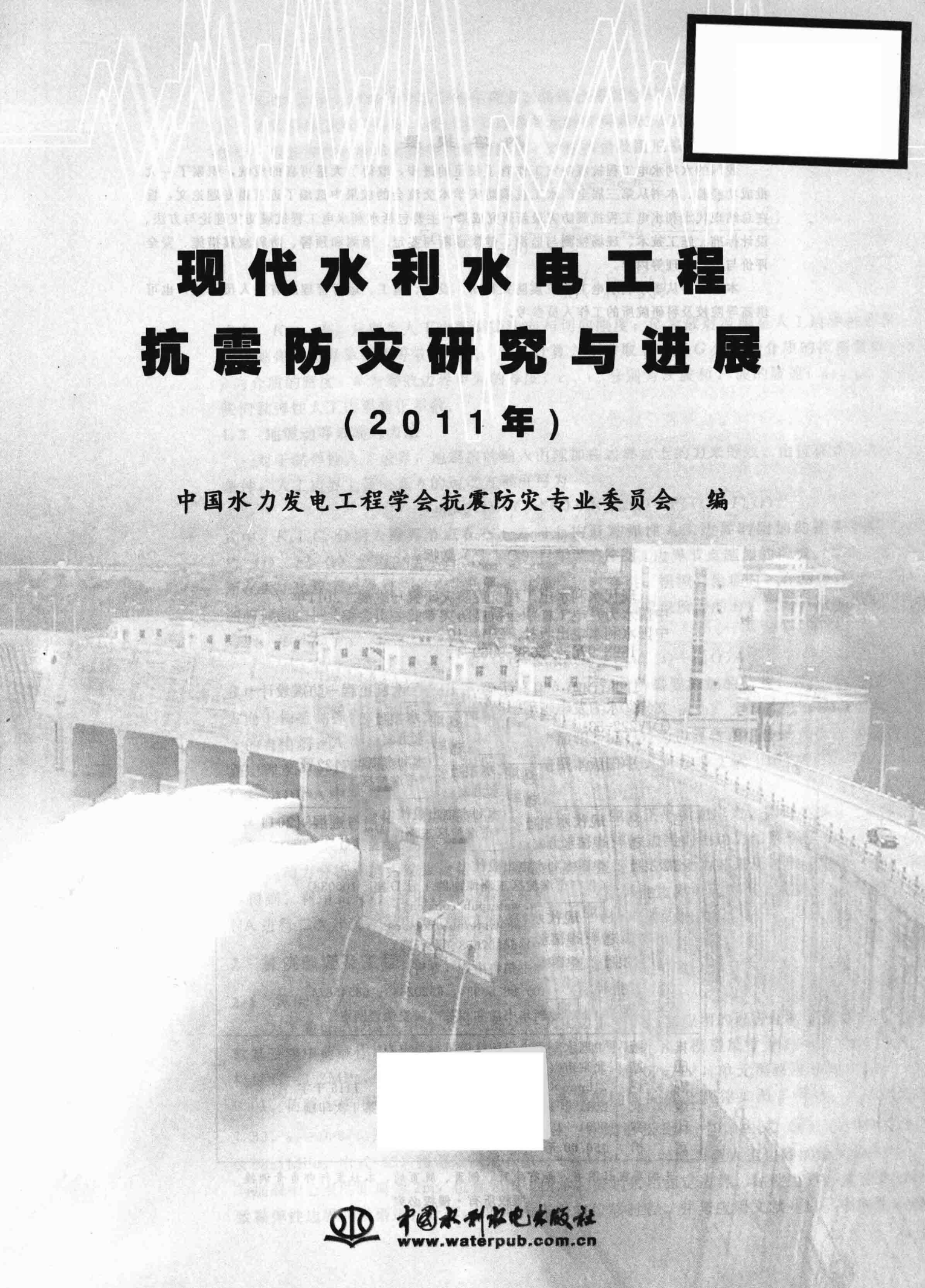
中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会 编

现代水利水电工程 抗震防灾研究 与进展(2011年)

XIANDAISHUILI SHUIDIANGONGCHENG KANGZHENFANGZAI
YANJIU YU JINZHAN
(2011年)



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



现代水利水电工程 抗震防灾研究与进展 (2011年)

中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

我国的水利水电工程抗震防灾工作有了长足的进步,取得了大量可喜的成就,积累了一大批成功经验。本书从第三届全国水工抗震防灾学术交流会的成果中选编了近百篇专题论文,旨在总结现代水利水电工程抗震防灾最新研究成果,主要包括水利水电工程抗震防灾理论与方法、设计标准、施工技术、现场检测与监测、健康诊断与鉴定、预测和预警、防震减震措施、安全评价与风险管理等内容。

本书可为从事水利水电工程抗震防灾科研、设计、施工、运行管理的有关人员阅读,也可供高等院校及科研院所的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代水利水电工程抗震防灾研究与进展. 2011年 /
中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会编. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-5084-9069-4

I. ①现… II. ①中… III. ①水利工程—防震设计—文集②水力发电工程—防震设计—文集 IV.
①TV222-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第207122号

书 名	现代水利水电工程抗震防灾研究与进展 (2011 年)
作 者	中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会 编
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	210mm×285mm 16 开本 36 印张 1115 千字
版 次	2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	150.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《现代水利水电工程抗震防灾研究与进展》 (2011 年)

指导委员会

- 主 席：李菊根（中国水力发电工程学会常务副理事长兼秘书长，教高）
副主席：孔宪京（大连理工大学常务副书记，教授）
徐卫亚（河海大学副校长，教授）
贾金生（中国水利水电科学研究院副院长，教高）
胡 斌（中国长江三峡集团公司主任，教高）
周建平（中国水电工程顾问集团公司总工程师，教高）
刘志明（水利部水利水电规划设计总院副院长兼总工程师，教高）

顾问委员会

- 主 席：潘家铮（中国科学院、中国工程院，院士）
副主席：林 皋（大连理工大学，院士）
张楚汉（清华大学，院士）
吴中如（河海大学，院士）
张超然（中国长江三峡集团公司，院士）
马洪琪（华能澜沧江水电有限公司，院士）
郑守仁（长江水利委员会，院士）
廖振鹏（中国地震局工程力学研究所，院士）

学术委员会

- 主 席：陈厚群（中国水利水电科学研究院，院士）
副主席：周 晶（大连理工大学，教授）
胡 晓（中国水利水电科学研究院，教高）
金 峰（清华大学，教授）
任旭华（河海大学，教授）
钮新强（长江勘测规划设计研究院，教高）
顾冲时（河海大学，教授）
李万红（国家自然科学基金委，教高）
景来红（黄河勘测规划设计有限公司，教高）

委 员：(以姓氏笔画为序)

马怀发	王仁坤	王柏乐	白俊光	艾永平	刘小生	刘浩吾
刘斯宏	冯树荣	吕明治	李小明	李术才	李俊杰	乔丕中
迟世春	张宗亮	张林	陆忠民	吴关叶	吴胜兴	陈国兴
陈健云	林绍忠	练继建	钱向东	党发宁	赵剑明	蔡新
杨启贵	范福平	杨伟林	章青	温续余	楼梦麟	

组 织 委 员 会

主 席：李同春(河海大学，教授)

副 主 席：李宏男(大连理工大学，教授)

孙志禹(中国长江三峡集团公司，教高)

沈凤生(国务院南水北调办公室，教高)

王光纶(清华大学，教授)

李德玉(中国水利水电科学研究院，教高)

党林才(水电水利规划设计总院，教高)

胡少伟(南京水利科学研究院，教高)

刘云贺(西安理工大学，教授)

杜修力(北京工业大学，教授)

张燎军(河海大学，教授)

委 员：(以姓氏笔画为序)

王春云	王君利	邓毅国	陈五一	冉懋鸽	孙怀昆	田斌
叶发明	刘海军	刘国明	刘君	李昇	李昕	严优丽
张志强	张伯艳	胡中平	吴世勇	肖锋	杨泽艳	徐建荣
徐建强	罗长军	罗加谦	高希章	贾超	禹之文	赵文光
赵坚	章建跃	黄光明	彭刚			

秘 书 长：张燎军

副秘书长：王海波 马震岳 邹德高

秘 书：赵兰浩 张汉云 李建波 徐斌 于龙 雷定演

主 编：张燎军

副 主 编：王海波 马震岳 邹德高

参 编：赵兰浩 张汉云 曹青 李建波 徐斌 雷定演

前 言

中国是水力资源最丰富的国家之一，80%集中在西部地区，水力资源理论蕴藏量、技术和经济可开发量，已建、在建和拟建工程等多项指标均居世界首位。水电是目前能大规模开发利用的清洁可再生绿色环保能源，大力开发利用可以改善我国的能源结构，是保障未来我国能源供应的重要举措。2011年中央1号文件首次聚焦水利，是新中国成立62年来中共中央首次系统部署水利改革发展全面工作，第一次全面深刻阐述水利在经济社会发展和生态环境改善中的重要地位；第一次将水利提升到关系经济安全、生态安全、国家安全的战略高度；第一次鲜明提出水利具有很强的公益性、基础性、战略性。水利水电对我国经济社会发展具有重要的战略意义。

我国是一个自然灾害严重的国家，特别是近年来自然灾害多发、并发、重发，灾情之重历史罕见：2006年川渝百年未遇的旱情；2008年“5.12”汶川8级特大地震造成大量水库震损；2009年北方冬麦区大范围的干旱；2010年西南历史罕见特大干旱；2010年110多条河流发生超过历史记录的特大洪水；2010年“4.14”玉树7.1级强震；2010年舟曲特大泥石流等。这些自然灾害中，水利水电工程的抗震防灾与国计民生休戚相关。

中国西部地区为新构造运动强烈、地质环境极不稳定的高山峡谷区，地震、滑坡、崩塌、泥石流等灾害高发。全国已建和在建超过100m的大坝145座，超过200m的有15座。一批200~300m级战略性工程，规模巨大、地震烈度高，设计施工艰难。在地质条件复杂的地震高烈度区，抗震安全成为工程建设中的关键。

中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会自2006年以来，每年召集全国水利水电领域的科研、教育、建设、设计、施工单位专家学者，就水利水电及相邻领域工程的抗震防灾理论与方法、设计标准、施工技术、减震隔震技术、现场测试、健康诊断与鉴定、预测和预警、灾害评估、风险管理等，举行学术交流会或高级研讨会，研究总结我国现代水利水电工程抗震防灾的最新成果。

本书为从第三届全国水工抗震防灾学术交流会的成果中选编了近百篇专题论文，为从事水利水电工程科研、设计、施工的建设者提供参考。

中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会

2011年10月

目 录

前言

大 坝

溪洛渡等特高拱坝的关键技术研究与实践 (一)

.....	王仁坤 (3)
超高心墙堆石坝大型振动台模型试验及数值模拟	
.....	袁林娟 刘小生 汪小刚 杨玉生 杨正权 (14)
基于材料非线性的坝体—地基体系损伤本构模型研究	郝明辉 张艳红 陈厚群 (21)
地震次生灾害作用下高坝风险分析研究	贾 超 王志鹏 高 凤 任青文 (26)
高混凝土重力坝在强震作用下损伤破坏的数值模拟	宋 常 冯 新 周 晶 (32)
基于内力法理论的拱坝动力计算	陈正作 刘 蕾 (38)
基于随机变量分析的高库大坝结构自振频率的数值计算研究	
.....	朱学佳 曹志翔 林 俊 张赤字 麦天佑 (46)
土石坝震害与抗震安全	朱 晟 (51)
官地重力坝极限抗震能力初探	李德玉 张伯艳 何建涛 (65)
施工期裂缝对拱坝静动力响应的影响	张伯艳 李德玉 何建涛 (70)
地震作用下混凝土坝的老化损伤分析	牛志国 王玉良 (77)
数字图像相关技术在拱坝冲击破坏模型试验中的应用	雷 冬 任青文 王山山 乔丕忠 (81)
频率非平稳对大岗山拱坝非线性响应的影响	张翠然 陈厚群 涂 劲 (85)
“5.12”汶川地震震损水坝特征及震害影响因素分析	梁海安 景立平 李永强 刘春辉 (94)
坝体—地基—库水体系的动力有限元分析及其工程应用	龚亚琦 陈 琴 崔建华 (100)
水库淤沙对拱坝地震响应的影响研究	闫毅志 张燎军 杨华舒 苏志敏 武 亮 (108)
地震作用下心墙堆石坝动力响应分析	徐 晗 饶锡保 黄 斌 陈 云 潘家军 (112)
紫坪铺“5.12”震害对面板堆石坝抗震措施的若干启示	赵剑明 周国斌 温彦锋 贾金生 (116)
考虑前期震动影响的紫坪铺面板坝震后抗震安全评价	
.....	赵剑明 贾金生 温彦锋 陈 宁 刘启旺 刘小生 (121)
董箐混凝土面板堆石坝地震响应特性研究	田 斌 卢晓春 孙大伟 童富果 (127)
基于 ABAQUS 的高混凝土面板堆石坝地震反应三维非线性分析	
.....	潘家军 王观琪 陈 云 (133)
多孔介质淤沙对混凝土坝地震响应的影响分析	闫毅志 张燎军 杨华舒 苏志敏 武 亮 (139)
面板堆石坝静动力分析研究概述	明 宇 蔡 新 郭兴文 (143)
土石坝坝体和地基液化分析方法与评价	
.....	杨玉生 刘小生 赵剑明 陈 宁 刘启旺 温彦锋 (149)
汶川地震中土石坝地震灾变过程三维再现	李永强 景立平 梁海安 刘春辉 (158)
混凝土重力坝全坝段三维动力分析	王海波 杨会臣 (165)

考虑坝体与坝肩动力相互作用的坝肩稳定动接触降强算法

.....	李同春	朱寿峰	赵兰浩	胡继刚	(173)
考虑温度荷载的丹江口大坝非线性地震反应分析	颜天佑	李同春	赵兰浩		(179)
强震作用下高拱坝损伤开裂研究	程恒		张燎军		(184)
沙牌拱坝整体抗震安全评价	程恒		张燎军		(189)
基于虚拟裂缝模型的带横缝高拱坝的抗震性能研究	张汉云		张燎军		(196)
高拱坝地震灾变破坏机理与溃坝仿真分析	张景奎		张燎军		(202)
高面板堆石坝面板应力分析及抗挤压破坏措施	孔宪京	周扬	邹德高	徐斌	(208)
基于广义塑性模型的高面板堆石坝静、动力分析	邹德高	徐斌	孔宪京	刘京茂	周扬 (214)
地震波斜入射对高拱坝地震反应的影响	杜修力	徐海滨	赵密	王进廷	(221)

其他建筑物

四柱支撑网架结构的消能减震控制研究	黄瑞娟	魏建国	王森林		(231)
超大跨径变截面钢筋混凝土拱式渡槽抗震分析	胡少伟		游日		(235)
超大拱式变截面渡槽收缩徐变影响研究	游日		胡少伟		(243)
浅海重力式平台在三维地震作用下的动力分析	邹晓红	王银邦	冯义然		(249)
地震荷载作用下地下厂房洞室群的动力响应分析	刘宁		张春生		(255)
基于 MATLAB 数值计算的输电铁塔整体体系抗震性能分析	朱学佳	曹志翔	曹秀丽	林俊	张赤宇 (260)
铅芯橡胶隔震双槽渡槽设计与动力分析	丁晓唐	颜云燕	唐德嘉		(266)
减隔震装置下渡槽槽—水耦合体动力响应特点研究	聂利英	高志成	朱广甫	潘哲	(272)
排架支撑式渡槽排架损伤下地震响应分析	聂利英	朱永虎	刘国光	潘哲	(277)
地基基础对风力发电机塔架系统地震响应的影响研究	曹青		张燎军		(282)
矩形容器内液体三维晃动特性研究	贾善坡		许成祥		(288)
内河框架直立式码头抗震分析方法及措施的探讨和应用	谭伦		王多垠		(293)
不等高门式刚架结构采用黏滞阻尼器的减震控制研究	刘学锋	王森林	魏建国		(298)
复杂结构进水塔抗震与稳定性研究	祁勇峰	崔建华	谢晓玲		(302)
地震作用下堤防风险分析研究	蔡新	李益	吴威	叶松	(307)
陡峭建基面溢洪道挑坎动力稳定性分析	张继勳	王超	陶冉冉		(313)
地震作用时复杂地质条件下开敞式溢洪道挑坎静动力特性分析	陶冉冉	任旭华	王超		(317)
水闸闸室抗震动力分析及措施	朱庆华		顾美娟		(324)
均质土坡抗震稳定安全度拟静力分析方法探讨	李阳		李同春		(329)
睢宁二站对顶钢板对结构应力变形和抗震性能影响研究	郭连琴	张燎军	李龙仲	白莉萍	许明德 (334)
白鹤滩水电站左岸边坡天然状态动力稳定数值计算分析	戴妙林	李同春	徐建荣	胡继刚	陈威 (339)
灰色理论在堤防安全评价中的应用	严伟	蔡新	李益	吴威	(346)
探地雷达在堤防检测中的应用	杨建功	江泉	刘文颖	杨建贵	(351)
潮汐河口特大跨度水闸抗震标准及设防措施	季永兴		张燎军	卢永金	(356)
节理参数对水电站地下洞室围岩地震反应的影响研究	谷宁		张运良		(362)
两河口水电站进水塔结构分析	张运良	谷玲	包莉	马艳晶	唐碧华 谷宁 (368)
地震作用下土质库岸边坡失稳运动及初始涌浪数值模拟方法	赵兰浩		杨庆庆	李同春	(374)

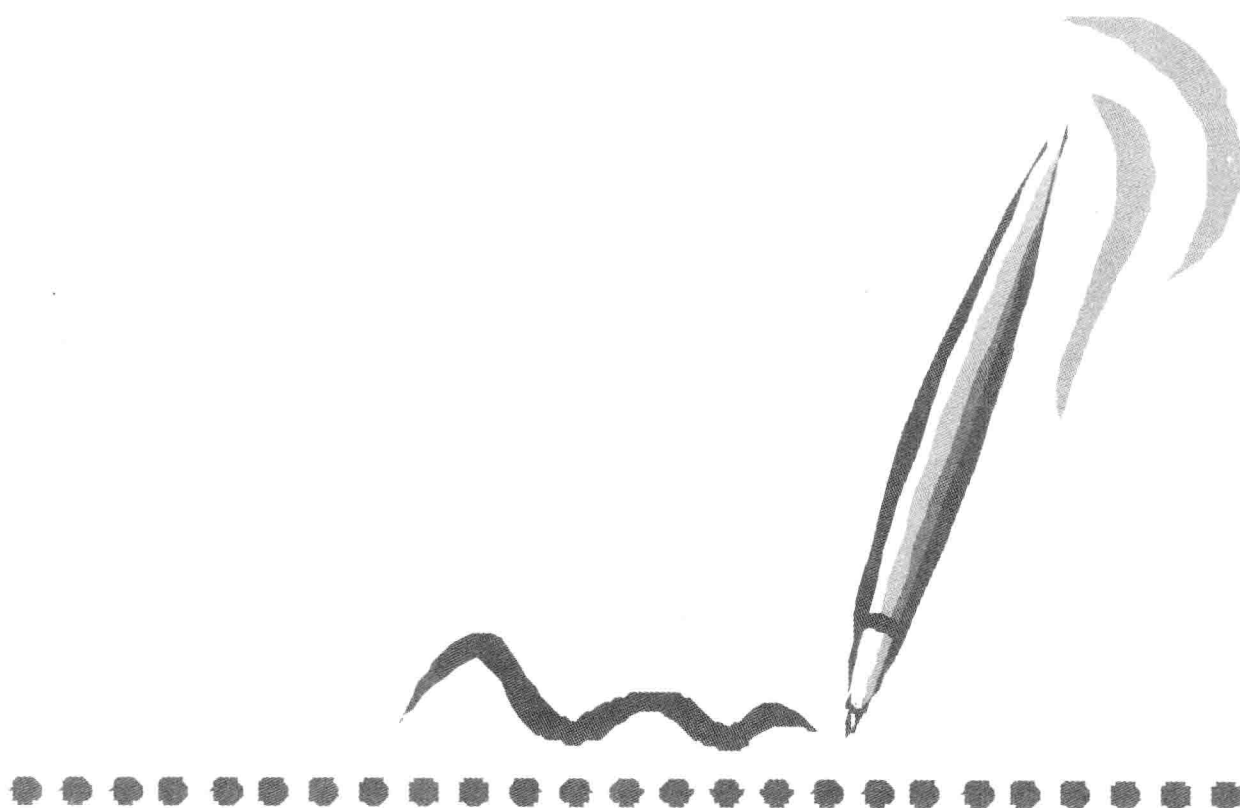
软基上大型泵站及基础抗震关键技术研究

..... 张燎军 郭连琴 李龙仲 白莉萍 许明德 张 洋 (380)	
水电站厂房振动传递路径的仿真模拟及结构振动特性研究	张燎军 魏述和 陈东升 (386)
大型泵站混凝土底板冷却水管布置方案研究	陈 伟 张燎军 卢 斌 白莉萍 张 洋 陈亚军 (392)
火灾作用下钢管混凝土排架柱的温度应力分析研究	胡 森 张燎军 张汉云 李龙仲 (398)
节点连接方式对钢管混凝土组合结构整体性能的影响研究	李龙仲 张燎军 张汉云 胡 森 (403)
大型泵站底板冬季施工温度应力及保温措施研究	卢 斌 张燎军 陈 伟 白莉萍 张 洋 郑孝军 (409)
水电站地面厂房的鞭梢效应及抗震分析	张汉云 张燎军 李龙仲 胡 森 (413)
阿海水电站厂房结构抗振分析	曹连朋 赵兰浩 曹泽伟 卢珊珊 夏 辉 (419)
水电站机组与厂房耦联振动测试及有限元数值反馈计算	宋志强 马震岳 刘云贺 (423)

试验研究与计算方法

混凝土断裂试验中的声发射特性研究	胡少伟 陆 俊 范向前 (431)
混凝土双轴受压动态强度准则	王立成 宋玉普 (438)
不同特性混凝土冻融循环后双轴压压统一强度准则	王立成 (443)
混凝土动力塑性损伤分析中的单元尺寸效应探讨	郭胜山 陈厚群 李德玉 马怀发 (449)
势流体和 Housner 模型动力研究比较	丁晓唐 刘 广 蒋 勇 (456)
高速摄影测量在振动台动力模型试验中的应用	杨会臣 贾金生 王海波 (461)
水工结构动态响应并行计算研究	王立涛 马怀发 陈厚群 刘金朝 (466)
弹塑性动力学方程的隐式阻尼迭代法	马怀发 王立涛 梁国平 (471)
全级配混凝土动态特性试验研究综述	李春雷 胡 晓 马怀发 (476)
堆石料三轴试验中的颗粒破碎研究	杨玉娟 潘家军 陈 云 (483)
深厚覆盖层场地地震反应分析研究	杨正权 刘小生 赵剑明 赵军强 陈 宁 刘启旺 (487)
基于广义塑性理论的土体液化分析方法	牛志伟 李同春 李宏恩 (493)
现代岩土分析的几个问题	葛孝月 陈桂杰 (498)
PCCP 超载破坏试验分析与研究	胡少伟 刘晓鑫 (505)
水工建筑物抗震设计规范的修编	陈厚群 (515)
pFEFG 系统及其在水利行业的应用	于春丽 (523)
基于黏弹性人工边界的防洪堤动力有限元分析	谯 雯 刘国明 (528)
软土动应力—应变曲线复合指数—正弦模型	王 伟 凌 华 孙斌祥 (534)
土与水工结构接触面模型研究	王 伟 卢廷浩 王旭东 (539)
滨海软土动剪模量及阻尼比数学模型	郭进军 王 伟 冯 丽 (544)
氯离子侵蚀筑坝红土的试验研究	李晋豫 杨华舒 陈 刚 殷小林 邵 洛 (549)
基于相对位移反应谱分析的岩石爆破震动损伤评估	孙新建 孙建生 (553)
基于地震动土压力非线性分布的集中参数法研究	陈 立 张燎军 (559)
基于 ADINA 软基上地震动输入方法研究及其应用	尹广斌 张燎军 俞佩斯 (564)

大坝



溪洛渡等特高拱坝的关键技术研究与实践 (一)

王仁坤

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 四川成都 610072)

【摘要】 溪洛渡等特高拱坝高达 300m 量级, 关键技术问题突出。本文结合溪洛渡、锦屏 I 级、伊朗巴哈蒂瑞里等 6 座特高拱坝设计实例, 将分期阐述特高拱坝的安全分析与评价、合理建基面、体型优化设计、复杂基础处理技术、工程抗震、建坝材料、混凝土施工与温控、运行监测与反馈等关键技术的研究方法、评价标准及应用实践, 供类似工程设计参考。本文主要讨论特高拱坝整体安全度、合理建基面的分析与评价及其工程应用。

【关键词】 整体安全度 合理建基面 特高拱坝

1 概述

拱坝主要以压力拱的形式, 将水压荷载传至两岸山体, 并以坝—基础的联合作用, 执行挡水任务。拱坝适合修建于 V 形和 U 形河谷, 是经济性与安全性都比较优越的坝型之一。近半个多世纪以来, 我国先后建设了数百座拱坝工程, 其中坝高超过 100m 的混凝土拱坝已有 10 余座。于 1998 年建成的二滩拱坝高 240m, 是我国首座突破 200m 大关的特高拱坝。随着西部大开发和西电东送战略实施, 尤其低碳能源经济的发展, 水电资源迅猛开发, 高拱坝工程建设不断增多, 坝高规模已达世界最高水平。近几年建成的拉西瓦拱坝 (坝高 250m) 和小湾拱坝 (坝高 294m) 分别接近和超过苏联于 1980 年建成的英古里拱坝 (坝高 272m) 的高度。正在建设即将投入运行的特高拱坝有溪洛渡拱坝 (坝高 285.5m)、锦屏 I 级拱坝 (坝高 305m)、大岗山拱坝 (坝高 210m); 拟于近期开工建设的特高拱坝有白鹤滩拱坝 (坝高 289m)、乌东德拱坝 (坝高 265m)、龙盘拱坝 (坝高 273m)、马吉拱坝 (坝高 300m)、松塔拱坝 (坝高 313m) 等。我国的高坝建设尤其特高拱坝的建设如雨后春笋, 成为现代坝工建设技术发展的尖兵。

特高拱坝的坝高超过 200m 至 300m 量级, 承受的水推力巨大, 如溪洛渡拱坝约 1500 万 t, 锦屏 I 级拱坝约 1300 万 t, 特高拱坝对基础地形地质条件的要求高, 工程关键技术问题更加突出, 如特高拱坝的安全分析与评价、拱端嵌深与合理建基面、复杂基础处理、拱坝体型、工程抗震、建坝材料、混凝土施工与温控、运行监测与反馈等关键技术问题, 大多超出我国现行《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)^[1-2] (适用于坝高不超过 200m 拱坝) 的规定, 均须开展专题论证研究。

成都勘测设计研究院先后承担设计的拱坝工程有二滩拱坝 (坝高 240m, 1998 年建成)、溪洛渡拱坝 (坝高 285.5m, 在建)、锦屏 I 级拱坝 (坝高 305m, 在建)、大岗山拱坝 (坝高 210m, 在建) 和伊朗巴哈蒂瑞里拱坝 (坝高 315m, 在建) 以及沙牌碾压混凝土拱坝 (坝高 132m, 2003 年建成, 经受了汶川地震远超过防烈度的考验)。这些特高拱坝的设计建设涉及许多关键技术问题, 组织了大量科技攻关, 取得了丰硕的成果。笔者作为技术骨干参加了二滩拱坝的设计, 并作为工程设总或院总工程师主持了金沙江溪洛渡拱坝、伊朗巴哈蒂瑞里拱坝设计和锦屏 I 级、大岗山拱坝关键技术问题的研究与策划以及怒江松塔拱坝 (坝高 313m) 的技术咨询。现就溪洛渡等特高拱坝的关键技术研究与实践分期阐述如下。

2 特高拱坝的安全分析与评价

2.1 拱坝常规安全分析

长期以来, 拱坝安全设计被分为坝体结构强度安全和基础抗滑稳定安全两部分, 并采用不同的分

析方法及其配套的经验安全系数来控制。

坝体结构强度安全是以点安全度为控制即结构容许应力设计,坝体应力按多拱梁法或弹性有限元一等效应力法计算。我国Ⅰ级高拱坝混凝土允许压应力水平多在8~10MPa;为了充分发挥压力拱的作用,拉应力控制在1.2MPa或1.5MPa以内。

在基础抗滑稳定分析中,由于基础岩体结构的复杂性以及影响拱座稳定因素较多,刚体极限平衡法一直是国内外长期运用的规范方法,并以最薄弱的结构面及其组合块体的安全系数来控制。我国规范规定Ⅰ级高坝按式(1)计算,要求抗剪断安全系数 $K_c \geq 3.5$ 或满足式(2)的要求;对纯摩安全系数未作明确规定。

$$K_c = \frac{\sum(Nf_1 + c_1 A)}{\sum T} \quad (1)$$

$$\gamma_0 \psi \sum T \leq \frac{1}{\gamma_{dl}} \left(\frac{\sum f_1 N}{\gamma_{m1f}} + \frac{\sum C_1 A}{\gamma_{m1c}} \right) \quad (2)$$

$$K_f = \frac{\sum Nf_2}{\sum T} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中的符号意义及取值分别参见参考文献[1]、[2]。

上述分析方法是拱坝设计的基本方法,亦称拱坝安全评价常规分析方法,被世界各国广泛采用成为规范方法,但不同国家对方法的运用及安全指标的控制不一,尤其在基础抗滑稳定分析方面。如欧洲有部分高坝设计仅采用式(3)计算并要求纯摩安全系数 $K_f > 1.0$ 作为控制,但强调采用最不利的滑块组合与取值及可能最大的荷载作为计算基础。又如苏联规范规定拱座稳定按承载力极限状态法设计,对应Ⅰ级高坝基本组合抗滑安全系数要求 $K_c \geq 1.67$;并按此标准设计建成了契尔盖、英古里两座拱坝,其计算安全系数分别为 $K_c = 1.5$ 和 $K_c = 1.8$ 。美国垦务局规范控制水平大致与我国相当,日本规范要求略高。

采用我国规范设计并建设了一系列高拱坝工程,积累了丰富的经验。对于特高拱坝设计也同样开展常规方法分析并以规范对Ⅰ级工程的安全标准来评价。但特高拱坝因坝高涉及的基础范围大,基础地质条件大多复杂,采用规范方法分析坝肩稳定也常常出现抗滑安全系数难于满足规范对Ⅰ级工程的要求;如在溪洛渡拱坝和锦屏Ⅰ级拱坝设计中无论拱端嵌深如何均出现了基础关键滑块抗剪断安全系数难于满足 $K_c \geq 3.5$ 的要求;其中溪洛渡拱坝 $K_c = 3.2$,锦屏Ⅰ级拱坝 $K_c = 2.5$;但其纯摩安全系数 $K_f \geq 1.3$ 。

特高拱坝基础抗滑稳定安全系数计算值偏低,一方面是由于特定滑块的结构产状对稳定不利,另一方面与刚体极限平衡法的计算假定有关。从抗剪断计算式(1)可以看出:作用在滑块上的拱推力 $\sum T$ 和抗力 $\sum Nf_1$ 随坝高呈几何尺寸的3次方增加,而抗力 $\sum C_1 A$ 随坝高呈几何尺寸的平方关系增加。对一般高拱坝而言, $\sum C_1 A$ 的贡献相对较大(坝越低,权重越大),抗滑安全系数的计算值大,安全指标容易满足;对于特高坝由于 $\sum C_1 A$ 对 K_c 的贡献相对减少,抗滑安全的计算值势必要低,甚至不能满足规范对Ⅰ级高拱坝的控制要求。

鉴于特高拱坝的基础范围较大,基础岩体结构复杂,可能包括各种岩性的差异,断层、软弱带以及各种节理裂隙的存在,采用刚体极限平衡法分析坝肩稳定,难于真实反映基础各区受力特性及拱坝基础自调节能力,需要考虑坝与基础的整体作用进一步研究评价特高拱坝的实际安全状况。

2.2 整体安全度分析方法

区别于常规安全分析,整体安全度分析将大坝与基础作为整体,采用非线性有限元分析方法,计入特高拱坝复杂基础的主要地质条件以及各种材料特性,反映基础岩体渐进破坏模式以及坝体结构的开裂破坏、压剪屈服等,更能反映水推力作用下的拱坝自调整能力。

鉴于非线性有限元计算方法与计算程序的多样性,本文着重介绍应用理想弹塑性模型三维非线性有限元法及清华大学TIFINE程序。屈服条件采用D-P准则,即

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \leq 0 \quad (4)$$

其中, α 和 k 可通过拟合莫尔—库仑准则而得。

混凝土和岩体为低抗拉材料, 采用抗拉条件

$$\sigma_1 \leq \sigma_t, \quad \sigma_2 \leq \sigma_t, \quad \sigma_3 \leq \sigma_t \quad (5)$$

在程序流程上, 首先判断抗拉条件是否满足, 若不满足, 则调整应力满足之; 其次再按 D—P 准则判断调整应力。

材料破坏考虑三种模式 (对理想弹塑性模型而言, 屈服即为破坏): 剪切破坏 [相对于 D—P 准则, 式 (4)]; 拉坏 [式 (5)]; 拉—剪破坏, 即材料既拉坏又剪坏。

对弹性区域采用点安全系数描述该点的安全程度, 采用与 D—P 准则相一致的点安全系数定义为

$$P = \frac{k - \alpha I_1}{\sqrt{J_2}} \quad (6)$$

对应弹性区 $P > 1$, 拉坏区 $P \geq 1$, 剪切破坏区和拉—剪破坏区 $P = 1$ 。

整体稳定性以迭代是否收敛并结合屈服区贯通范围综合判断。

非线性有限元法分析的计算域包括整个大坝和足够范围的地基基础; 其中基础可模拟不同岩类分区及较大规模的断层、错动带和坝肩构成可能滑移的优势产状裂隙。计算工况包括正常荷载组合和超载工况。

正常荷载工况重在分析大坝工作属性, 包括坝体应力分布及超限应力区, 有无开裂及屈服破坏区, 基础各部位点安全系数等。当然, 点安全度指标反映的是局部岩体的抗剪裕度, 是一个标量, 点安全度不足并不一定意味着局部区域的失稳。

超载工况特指正常组合中仅水压超载, 且以超水容重的方式增加水压。特将基本组合工况记为 P_0 , 在 P_0 的基础上增加一倍水压记为超载工况 $2P_0$, 再增加一倍水压记为超载工况 $3P_0$, 以此内推。超载工况 kP_0 即指基本组合中水压荷载达 k 倍, 并记超载系数为 K 。

通过逐级超载, 分析坝体结构或基础起始开裂的超载系数 K_1 和结构系统开始出现非线性屈服变形 (即结构系统出现大变形) 时的超载系数 K_2 , 以及结构系统整体失稳, 既开裂屈服区贯穿坝体和基础时的超载系数 K_3 (或称极限承载能力超载系数)。通过整体非线性有限元分析, 不难得出逐级超载作用下的坝体任意点的变位曲线, 如图 1 所示。通过对多座已建大坝的校准分析或地质力学模型试验成果分析, 设计建设成功的高拱坝在正常运行情况下, 结构变形与荷载的对应关系多呈线性关系。甚至在有限超载范围内, 结构虽有局部开裂, 但整体仍然处于准线弹性工作状态。即超载系数 K_2 又是反映结构处于准线弹性工作极限状态点。 K_1 、 K_2 、 K_3 的物理意义如图 1 所示。

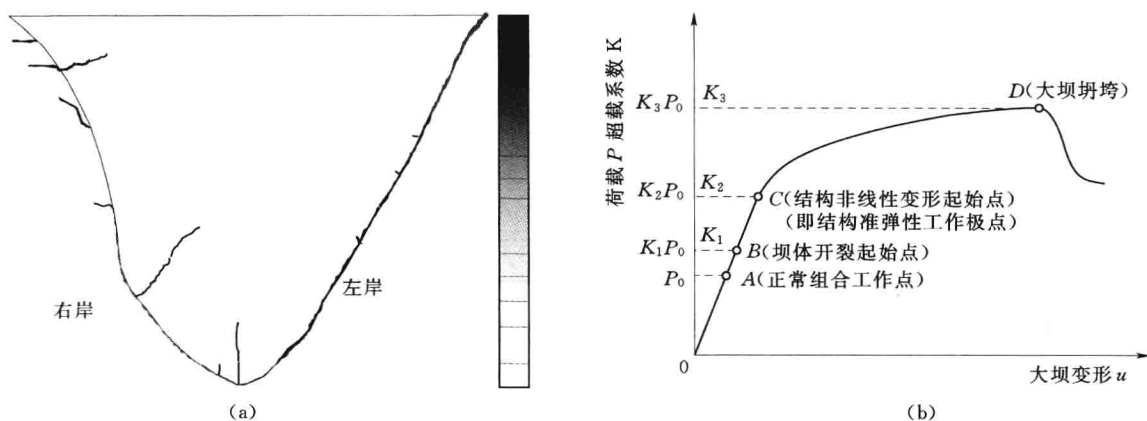


图 1 拱坝超载与变形关系曲线
(a) 拱坝立视图; (b) 拱坝超载与变形关系

2.3 整体安全度建议标准

采用上述拱坝整体稳定分析方法分析了国内外已建 20 多座高拱坝和特高拱坝工程, 得出了正常

组合下的控制点安全系数（表 1）；整理了清华大学多年来开展的 10 多座典型高拱坝整体稳定分析及地质力学模型试验在超载作用下的 K_1 、 K_2 、 K_3 系数，成果值见表 2。

表 1 国内外部分高拱坝点安全度统计表

工 程 名 称	点安全度 P. S. F	工 程 名 称	点安全度 P. S. F
黑部川	2.5	二滩	2.0
川治坝	1.8	英古里	2.0
川侯坝	2.5	龙羊峡	1.5
奈川渡	2.0	拉西瓦左岸 II 号变形体	1.5
马尔帕赛	0.5	科尔布赖恩	0.7
白山	1.8	李家峡左岸金三角体	1.2
石门子	2.5	小湾拱坝基础	1.5
紧水滩	2.3	龙滩左岸地基	1.2
喀次	2.1	溪洛渡（可研方案）	2.0
东风	1.3	溪洛渡（实施方案）	2.0
伊泰普	2.0	锦屏 I 级	1.5

表 2 国内典型高拱坝坝体特征参数及超载安全度

编号	工 程 名 称	坝高 (m)	弧长 (m)	坝底厚 (m)	厚高比	弧高比	K_1	K_2	K_3
1	紧水滩双曲拱坝	102	392.8	24.61	0.24	3.85	2.0	3.9	10.0
2	东风双曲厚拱坝	166	272.2	33	0.20	1.64	2.0	4.0	12.0
3	东风双曲薄拱坝	166	272.2	32	0.19	1.64	2.0	3.8	8.0
4	李家峡双曲拱坝（地基不处理）	165	438	45	0.27	2.65	1.6	3.0	5.4
5	铜头双曲拱坝（地基加固）	75	110	15.3	0.20	1.47	1.5	1.5	4.0
6	薯沙溪	82.3	222.8	14	0.17	2.71	1.3	2.5	3.5
7	锦屏 I 级（天然）（2003）	305	698.1	72	0.24	2.29	1.5~2.0	3.0~4.0	5.0~6.0
8	锦屏 I 级（基础处理）（2003）	305	568.6	58	0.19	1.86	2.0	3.5~4.0	6.0~7.0
9	锦屏 I 级（基础处理）（2006）	305	552.2	63	0.21	1.81	2.0	4.0~5.0	7.5
10	小湾双曲拱坝	292	937.3	72.91	0.25	3.21	1.5~2.0	3.0	7.0
11	二滩双曲拱坝	240	775	55.74	0.23	3.16	2.0	4.0	8.0
12	构皮滩（处理）	232.5	552.5	50.28	0.22	2.38	2.4	4.4	8.6
13	拉西瓦（2004）	250	545	49	0.20	2.18	2.1	3.5~4.0	7.0~8.0
14	溪洛渡拱坝（可研方案）	278	710	69	0.25	2.55	1.8~2.0	5.0	6.5~8.0
15	溪洛渡拱坝（实施方案）	278	650	62	0.22	2.34	2.0	4.5	8.5
16	大岗山	210	623.7	52	0.25	2.97	2.0	4.5	9.5

从表 1 所示已建工程的点安全系数来看，正常运行高拱坝的点安全系数 $K_p=1.2\sim 2.5$ ，其中特高拱坝二滩 $K_p=2.0$ ，龙滩拱坝 $K_p=1.2$ 。世界著名的马尔帕赛拱坝基础的点安全系数为 0.5，科尔布莱恩拱坝坝体结构的点安全系数为 0.7，远低于体系维持稳定 $K_p>1.0$ 的要求；这就造成前者的失事和后者蓄水过程中坝体底部开裂贯穿，并出现较大的不可逆变位而不得不降低库水重新加固的事实。显然，点安全系数越高拱坝越安全，从已建并长时期处于正常运行的拱坝点安全度分析，点安全系数 $K_p\geq 1.2$ 是高拱坝和特高拱坝稳定安全最基本的要求。

从表 2 所示典型高拱坝的超载安全系数分析，特高拱坝的起裂超载安全系数 $K_1=1.5\sim 2.0$ ，非线性变形超载安全系数 $K_2=3.0\sim 4.5$ ；拱坝基础处理改善了基础均匀性及承载条件， K_1 、 K_2 可提

高 10% 以上。不同工程的极限承载能力超载系数 K_3 差异较大, 变化幅度在 5~10。鉴于极限承载能力的把握, 无论在计算分析还是模型试验均有一定难度, 而且正常运行的高拱坝工程的极限承载能力超载系数差异较大, 建议拱坝整体安全度的控制关键在 K_1 、 K_2 。并建议特高拱坝 $K_1 \geq 1.5$ 、 $K_2 \geq 3.5$ 。

2.4 溪洛渡拱坝整体稳定分析

溪洛渡拱坝高 285.5m。坝址区河道顺直, 岸坡陡峻, 河谷宽高比约 2.0, 呈对称 U 形, 坝基岩体为玄武岩, 整体块状结构, 强度高, 但发育有多条层间层内错动带, 产状多平缓, 四组节理裂隙以陡倾角分布。拱端建基岩体以 II、III₁ 岩体为主, 部分 III₂ 岩体; 河床坝基因潜伏 III₂ 岩体及错动带的影响, 河床基础扩大开挖并设置混凝土垫座结构。

拱坝整体稳定分析模拟大坝与较大范围的基础, 包括全部层间层内错动带及主要节理裂隙以及各级岩体分布, 如图 2 所示。根据上述整体稳定分析方法分别计算了正常组合与超载工况下的应力变形, 开裂屈服、破坏过程以及整体安全度。图 3 为大坝坝面主应力分布, 图 4 为大坝在正常组合及超载作用下的点安全度和屈服区分布。

分析成果表明:

(1) 基本组合作用下 ($1P_0$), 坝体应力位移正常, 上下游坝面没有开裂屈服, 大坝与基础处于弹性工作状态。两岸拱座基础点安全系数 $K_p \geq 3.0$, 河床基础点安全系数 $K_p \geq 2.0$ 。

(2) 在超载 $2P_0$ 时, 河床下游坝趾局部屈服, 上游坝踵局部开裂, 坝体应力重新调整, 坝趾区压应力有所增加; 坝基岩体稳定, 没有屈服区; 整体处于新的静力平衡; 结构体系处于准弹性工作状态。起裂超载系数 $K_1 = 2.0$ 。

(3) 在超载 $3P_0$ 时, 上游坝踵开裂扩展, 下游坝趾表面屈服, 下游中部坝体屈服, 在超载 $4.5P_0$ 时大坝开始出现非线性变形, 下游坝面有大面积的表面屈服区, 大坝—地基系统进入屈服阶段。随着荷载继续增加, 体系变形加剧, 但尚未完全丧失承载能力。非线性变形超载系数 $K_2 = 4.5$ 。

(4) 在超载 $5P_0$ 时, 拱端及上部坝体屈服, 整个坝体呈现非线性变形。到超载 $8.5P_0$ 时, 开裂屈服区贯穿坝体及基础, 极限超载系数 $K_3 = 8.5$ 。

采用同样的方法分析了锦屏 I 级、大岗山等特高拱坝, 整体安全度指标分别列于表 1 和表 2。溪洛渡和锦屏 I 级拱坝在正常组合作用下的点安全系数分别为 $K_p = 2.0$ 和 $K_p = 1.5$; 在超载作用下溪洛渡、锦屏 I 级、大岗山的起裂超载系数均为 $K_1 = 2.0$, 与正常运行的二滩、东风拱坝一致; 它们的非线性变形超载安全系数 $K_2 = 4.5$, 约大于二滩、拉西瓦等拱坝。溪洛渡、锦屏 I 级、大岗山拱坝的整体安全有保障。

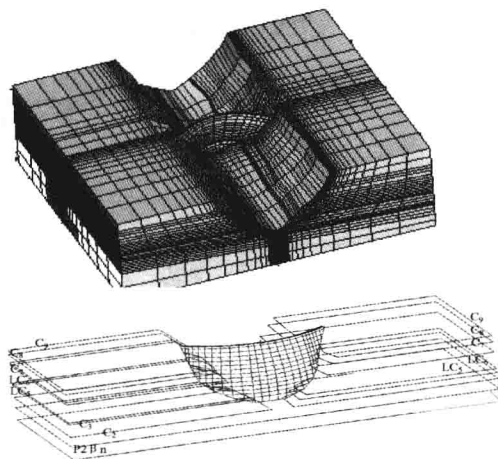


图 2 溪洛渡拱坝计算网格及层间错动带示意图

3 拱坝合理建基面的研究与应用

特高拱坝承受的水推力巨大, 作用在建基面上的压应力高达 9~10MPa (多拱梁法计算值), 建基面基础必须具备足够的承载能力和长期运行安全稳定性。特高拱坝的基础条件大都比较复杂, 受风化卸荷、断层等软弱带和节理裂隙的影响, 必然存在不同等级岩体。拱坝建基面的确定事关工程安全与结构设计的技术经济合理性。特高拱坝对基础的要求高, 对安全与经济的影响大。如何确定特高拱坝的建基面一直是工程设计最棘手的问题。

通常情况下, 建基面嵌入深度越大, 基岩完整性越好, 其承载力越高, 基础安全越有保障。但另一方面, 随着建基面嵌入深度的增加, 拱跨加大, 承受的库水压力增大, 坝体结构和坝肩抗滑稳定的

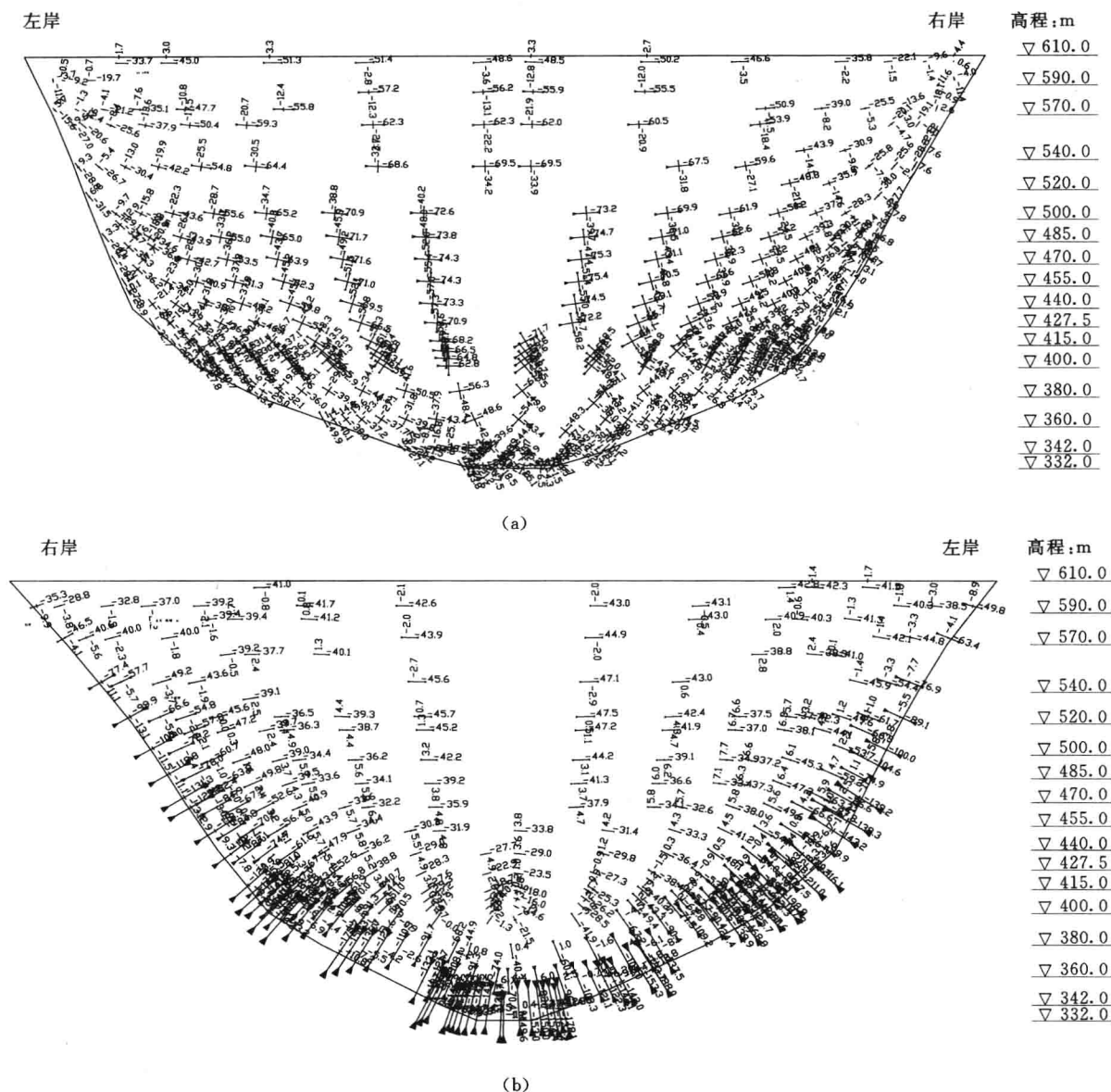


图3 溪洛渡拱坝坝面主应力分布(单位:0.1MPa)

(a) 上游面; (b) 下游面

负担加重;同时嵌深过大会导致因基础开挖而引起基础回弹变形和高边坡稳定等问题,以及开挖和大坝混凝土工程量急剧增加。由此可见,建基面的确定受到一些相互矛盾的因素制约。

苏联和美国只规定拱坝地基在开挖和处理后应满足结构设计要求,并着重指出要尽量减少开挖。我国规范长期以来出于安全的考虑,规定Ⅰ级高拱坝的基础以微新岩体为主,先后建设了一系列高拱坝工程,包括近期建设的小湾、拉西瓦、构皮滩等特高拱坝工程。二滩拱坝建基岩体突破了微新岩体的约束,大量采用了弱风化岩体。我国新颁布的规范^[2]也已提出应根据坝址具体情况,综合研究确定选择新鲜、微风化或弱风化中、下部的基岩作为建基岩体,表明了建基面选择的发展方向。

3.1 建基面嵌深设计原则

特高拱坝建基面的嵌深对工程安全与经济合理性的影响极大。如何确定特高拱坝建基面尚无可参照的评价体系。笔者在潘家铮院士的指导下,深入分析了二滩等一系列高拱坝的安全状况与超载能力,结合溪洛渡拱坝建基面嵌深优化研究,提出以岩级为基础,安全为准则,即分坝高区段确定建基岩体等级,合理利用弱风化Ⅲ级岩体作为建基岩体。建立以常规安全要求和整体安全度评价的特高拱