



2013

水力学与水利信息学

ADVANCE IN HYDRAULICS
AND HYDROINFORMATICS 进展
IN CHINA 2013

陈永灿 刘之平 张永良 王连祥 主编

清华大学出版社

2013

水力学与水利信息学

ADVANCE IN HYDRAULICS AND HYDROINFORMATICS **进展**
IN CHINA 2013

陈永灿 刘之平 张永良 王连祥 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书收集了在第六届全国水力学与水利信息大会上交流的论文 48 篇, 内容涵盖: 工程水力学, 生态与环境水力学, 水利信息学的新进展和海洋能源开发中的水力学问题。论文成果体现了 2011—2013 两年来水力学与水利信息学领域的最新进展和动态, 从多方面、多角度体现了我国水力学学科的发展水平。

本书适用于水利水电工程设计、施工、管理等单位的专业技术人员, 同时可供水力学与水利信息学方面高等院校和研究机构的高年级学生、研究生和科学研究人员参考。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

2013 水力学与水利信息学进展/陈永灿等主编. --北京: 清华大学出版社, 2013

ISBN 978-7-302-32550-5

I. ①2… II. ①陈… III. ①水力学-文集 ②信息技术-应用-水利工程-文集 IV. ①TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 109954 号

责任编辑: 张占奎

封面设计: 常雪影

责任校对: 王淑云

责任印制: 宋 林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 北京嘉实印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 210mm×285mm 印 张: 20.5 字 数: 580 千字

版 次: 2013 年 6 月第 1 版 印 次: 2013 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1~1000

定 价: 65.00 元

产品编号: 053819-01

第六届全国水力学与水利信息学大会

2013年6月8—10日 北京

主办单位： 国际水利与环境工程学会中国分会
中国水利学会水力学专业委员会
中国水力发电工程学会水工水力学专委会
承办单位： 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室

会议议题

中心议题：智者乐水 人水和谐

A 工程水力学

- 水工水力学与工程安全；Engineering hydraulic and project safety.
- 江河湖库水力学.
- 冰工程和冷却水与可再生能源水力学；Ice engineering, industrial hydraulics and renewable energy.
- 防洪工程与洪水管理；Floods and flood management.
- 水工模型与仪器；Experiment, instrumentation and scale models in river hydraulics.

B 环境与生态水力学

- 环境与生态水力学；Environmental hydraulics and eco-hydraulics.
- 水利水电工程建设与生态环境；Assessment and policy on hydro-environment.
- 城市、河湖水环境及其生态修复；Urban water environment engineering Restoration and environmental management.
- 海岸水质、环境与海岸保护修复；Coastal water quality and marine outfalls.
- 雨洪、污水、苦咸水资源化.

C 水利信息学的新进展

- 数值模拟与仿真技术；Computational hydraulics and hydrodynamics.
- 复合模型（原观、物模、数模）技术研究.
- 智能算法及其应用.
- 水信息的新兴技术及应用；Emerging technologies and engineering applications of hydroinformatics.

D 河口、海岸及海洋工程与极端事件应对

- 波浪、潮汐及海岸水动力学；Wave, tide and coastal hydraulics.
- 海洋新能源开发中的水力学问题.
- 滩涂开发与湿地保护；Land reclamation, wetland protection and shore restoration.
- 极端事件与灾害应对中的水动力学问题；Natural hazards and extreme events.

组织委员会

主 任	高季章			
副主任	陈永灿	吴一红		
委 员	李 云	唐洪武	周孝德	练继建
	肖白云	郭振仁	李文学	李赞堂
	张博庭	彭 静	祝世华	黄国兵
	余锡平	李克锋	江春波	许士国
	曾玉红	陈求稳	刘 敏	李丹勋
	苏祥林			

技术委员会

主 任	王光谦			
副主任	刘之平	王兆印	刘树坤	张永良
委 员	张长宽	曹叔尤	黄真理	程晓陶
	刘士和	吴时强	林鹏智	郭 军
	槐文信	董志勇	李志军	吴建华
	邱秀云	刘亚坤	傅旭东	高学平
	程 文	马吉明	黄岁樑	万莉颖

秘 书 处

秘 书 长	王连祥	
副秘书长	李春华	陈文学
秘 书	杨 帆	关 瑛

前 言

由国际水利与环境工程学会（IAHR）中国分会、中国水利学会水力学专业委员会和中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会共同举办、清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室承办的“第六届全国水力学与水利信息学大会”于 2013 年 6 月在清华大学召开。成功举办了五届的这系列会议已经成为我国水力学界的品牌学术研讨会，对促进我国水力学和水利信息学的学科发展与学术繁荣起到了积极的推动作用。

本次会议的中心议题为：**智者乐水 人水和谐**，包括四个分议题。这四个议题都针对我国水利水电工程建设中的热点和难点问题，旨在促进学科发展、技术进步和工程安全，展现创新性的成果，对建设“美丽中国”做出应有贡献。

本次会议得到了全国水利水电领域科技人员和广大师生的热烈响应和广泛支持。大会收到论文近 100 篇，其中包括中文论文 80 余篇和英文论文摘要近 20 篇。作者来自水利水电与生态环境领域的科研、设计、学校、咨询和管理等 28 个单位。经过学术委员会所组织的专家审阅，录用中文论文 79 篇，其中 73 篇论文将分别刊登在《水力学与水利信息学进展 2013》、《水利学报》和《水力发电学报》上。论文内容涵盖：工程水力学，生态与环境水力学，水利信息学的新进展和海洋能源开发中的水力学问题。大会正值第 35 届国际水利学大会召开的前夕，参加该国际会议的部分英文论文将在本届会议上宣读交流，不进入本论文集。

本次大会的成果体现了两年来水力学与水利信息学领域的最新进展和动态，从多方面、多角度体现了我国水力学学科的发展水平。我们相信本次会议为国内同行们提供了一个交流成果、切磋体会、共商发展的平台，进一步推动我国水力学与水利信息学的研究工作，使之更加生气勃勃、发达兴旺。

本次会议论文的编辑和出版过程中，刘树坤、张永良、槐文信、李克锋、吴建华等 47 名专家在百忙之中对论文进行了审阅，付出了辛勤劳动，秘书处王连祥、张永良、陈文学、杨帆等同志作了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢！

感谢清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室对本次的大力支持；感谢中国水利学会和中国水力发电工程学会长期以来对专业委员会的支持；感谢在经济上给予本次会议大力支持的单位；特别要感谢参加本次会议的来自全国的代表以及所有工作人员。

国际水利与环境工程学会
中国分会

主任：



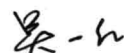
中国水力发电工程学会
水工水力学专业委员会

主任：



中国水利学会
水力学专业委员会

主任：



2013 年 5 月

目 录

工程水力学

消力池边墙水动力荷载试验研究	杨敏, 董天松, 李会平, 李树宁 (3)
两河口电站进水口事故闸门水力荷载特性研究	张文远, 张东, 杨帆, 章晋雄 (9)
伊江上游其培水电站泄洪消能特点及可行性研究	韩喜俊, 渠立光, 程子兵 (14)
南水北调中线干渠 PI 控制参数整定研究	郭晓晨, 穆祥鹏, 刘之平 (19)
跌坎消力池底板上举力的试验研究	李会平, 杨敏, 董天松, 李树宁 (27)
雾流降雨潜在危害程度综合评价研究	丹青松, 刘士和, 范敏 (32)
荆江三口分流分沙变化规律分析	郭小虎, 朱勇辉, 刘亚, 唐峰 (38)
基于降雨径流的平原河网水动力模拟	季益柱, 龚荣山, 焦创, 王玲玲 (47)
长江南京河段八卦洲汊道水动力条件改善措施初步研究	杨江浩, 王建中, 范红霞, 王志寰, 朱立俊 (54)
中国传统历法在冰情预报中的应用	王涛, 杨开林, 郭新蕾, 郭永鑫, 付辉 (66)
内陆湖泊作为热电厂循环水冷却池水温的验证计算	柳海涛, 赵顺安, 涂薇, 张天仓 (72)
红沿河核电厂二期工程温排水物理模型试验研究	梁洪华, 康占山 (82)
核电厂厂用水冷却塔三维数值模拟优化设计研究	李红莉, 赵顺安 (89)
进水口组合对分层取水下水温的影响	韩云鹏, 张少雄, 高学平 (95)
水电站取水排沙试验研究	武彩萍, 刘岗森, 陈俊杰, 宋莉莹 (101)
尾矿库排洪系统水力模型试验研究	郑双凌, 马吉明, 雒钊, 陈浩波, 韩文亮 (106)

环境与生态水力学

三峡后续工作库区生态环境保护的思考与对策	梁福庆 (113)
几种常用水质评价方法的比较分析	张晨, 李文猛, 高学平 (118)
中小河流治理水资源脆弱性分区分类研究	崔巍, 陈文学, 白音包力皋, 陈兴茹 (123)
水体底部微孔曝气增氧研究进展	曾映雪, 程香菊 (129)
水电站日调节泄流对下游水生生物栖息地影响的研究	王皓冉, 刘昭伟, 陈永灿, 朱德军, 王志刚 (136)
三峡建成后长江下游江心洲的萎缩机理研究	李志威, 王兆印, 李文哲, 潘保柱 (143)
三峡水库蓄水后松滋口分流分沙变化分析	王冬, 李义天, 邓金运 (152)
黄河输沙能力对气候变化的响应	严军, 白洪炉, 高玮, 何大伟 (159)
长江河口三角洲近期演变及趋势预估	杨云平, 李义天 (165)
转型跨越发展背景下太原市湿地保护研究	韩巧欠 (172)
河流公园规划概念及实例研究	陈兴茹, 王秀英 (176)
钱塘江杭州段水体营养盐和理化因子对蓝绿藻影响的研究	辜勇, 董志勇, 王硕硕 (181)
钱塘江桐庐至七堡段边滩水质监测分析	王硕硕, 董志勇, 辜勇 (188)
河道水流、泥沙与植被耦合作用机理研究综述	侯迪, 杜丽惠, 史莹, 江春波 (192)

底泥固化土再利用环境影响评估指标研究	王秀英, 白音包力皋, 许凤冉 (196)
海河河口地带小型底栖无脊椎动物群落与浮泥特性的关系	潘保柱, 王兆印, 李志威, 赵娜, 徐梦珍 (202)
天津市供需水预测分析及对策研究	朱秀清, 李胜军, 王仰仁 (211)
地下水库型城市雨洪综合利用系统	刘佳星, 严军, 何大伟, 白洪炉 (218)
基于多功能隧道的城市雨洪综合利用关键技术	严军, 高玮, 白洪炉, 刘佳星 (223)

水利信息学的新进展

无坝侧向引水口水力特性三维数值模拟研究	徐国宾, 田守霞, 龙岩 (229)
和谐 WAF 算法及间断浅水流中污染物传输问题的研究	杨金波, 段文刚, 黄国兵, 李订芳 (237)
RNG $k-\varepsilon$ 模型在连续弯道流场计算中的应用	郑建毅, 王虹 (244)
竖缝式鱼道三维数值模拟	叶茂, 吕海艳, 王川, 蒲云娟 (252)
冰体截留突发性污染物的数学模型研究	陈胖胖, 殷启军, 王军 (257)
泥沙沉降过程的细观尺度数值模拟	邱流潮 (261)
尾矿坝溃决的数值模拟及应用研究	张力霆, 齐清兰, 李强, 张少雄 (265)
堆石混凝土三维充填过程的数值模拟	姜路野, 牛小静 (271)
引入模糊理论的变电站主接线方案评价体系探讨	谭剑波, 郑丽 (278)
云计算与水信息发展新方向初探	段浩, 潘世兵 (282)

海洋能源开发中的水力学问题

异步相位潮汐能发电的水动力特性研究	刘秋林, 张永良 (289)
波浪能泵运行特性的数值分析	杨岑, 张永良 (298)
振荡式波浪能采集浮子的优化研究	张弘昭, 张永良 (307)

附录 A 《水利学报》2013 年第 8 期发表会议论文清单	(314)
附录 B 《水力发电学报》2013 年第 5 期发表会议论文清单	(315)

工程水力学

消力池边墙水动力荷载试验研究

杨 敏¹ 董天松^{1,2} 李会平¹ 李树宁¹

1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津, 300072, dtsgood@163.com

2. 长春工程学院, 长春, 130012

摘 要: 本文依托于某水电站消力池防护结构的水动力特性研究, 在水弹性模型试验的基础上, 对边墙进行水动力荷载响应测试。同时结合有限元模型对边墙动力响应进行数值计算, 进而评价其安全稳定性。结果表明: 边墙的主要振动为低频强迫振动, 与边墙结构的自振频率相距很大, 不会发生随机共振, 但边墙局部动应力偏大, 在进行结构设计时应采取适当措施予以加强。通过对模型试验与数值分析数据对比, 得出结果吻合良好, 说明了用数值模型进行消力池边墙动力分析是可靠的。本文的成果有实际的应用意义, 可为今后类似工程提供参考依据。

关键词: 水力学; 水弹性模型; 边墙; 水动力荷载; 有限元法

1 引言

水利工程在运行过程中, 由于高速水流内部的强烈紊动特性, 其脉动压力作用在建筑物上, 有可能引起建筑物的振动, 这种流激振动特性对于大流量、高流速以及轻型建筑物表现的更为突出, 使结构可能产生很大的振动位移, 由此引起结构失稳或造成巨大的应力破坏而发生事故。例如消力池导(隔)墙就属于典型的轻型薄壁水工结构, 国内外大型工程(如萨扬、三峡)都有较高的导(隔)墙, 对于这种高而薄的轻型结构来说, 当进行大流量泄洪时, 导墙结构受交变脉动压力而导致结构疲劳破坏和强烈振动是一个十分现实的问题, 应引起水利工作者的足够重视。虽然, 人们对水流诱发水工建筑物振动的认识已逐步深入^[1, 2], 但由于流激振动问题的复杂性, 许多影响因素在理论上至今难以找到准确的支撑, 因此, 为探明导(隔)墙在泄洪时的流固相互作用, 人们常常采用理论与模型试验相结合的方式进行。基于此, 本文通过模型试验专门研究某水电站消力池边墙的水动力特性, 并通过有限元计算, 分析消力池边墙的模态及动力响应, 从而评价其安全稳定性, 为工程设计提供参考依据。

2 模型简介及测点布置

某水电站位于云南省丽江市玉龙县与迪庆州香格里拉县交界的金沙江干流上, 电站装机容量 2400MW。混凝土面板堆石坝最大坝高 155m, 水库正常蓄水位 1618m, 死水位 1602m, 相应于正常蓄水位的库容为 7.27 亿 m³。溢洪道布置于右岸, 为枢纽的主要泄洪建筑物, 出口采用底流消能。溢洪道最大泄洪量 15500m³/s, 最大泄洪落差近 100m, 陡槽宽 73.5m, 如此巨大的水头落差和大泄洪量带来的结构流激振动稳定问题十分突出。

根据试验要求, 建立比例尺 1:50 的模型, 消力池边墙结构模型要同时满足水力学条件和结构动力学条件相似。按照这个要求, 本次试验按照模型材料的参数要求采用了定制的特殊加重橡胶材料进行模拟。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179119); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004); 西部交通建设科技项目(2009328000084); 水利部公益性行业科研专项项目(200901081)。

在桩号 0+470m 处安装 3 组电阻应变片测量在各工况水流荷载作用下的动应力,对应高程分别为 1516m、1507.5m、1499m; 在高程 1523.5m 处安装两个位移传感器测量导墙顶部动位移,对应桩号分别为 0+464m、0+476m。位移传感器与应力测点具体布置见图 1。

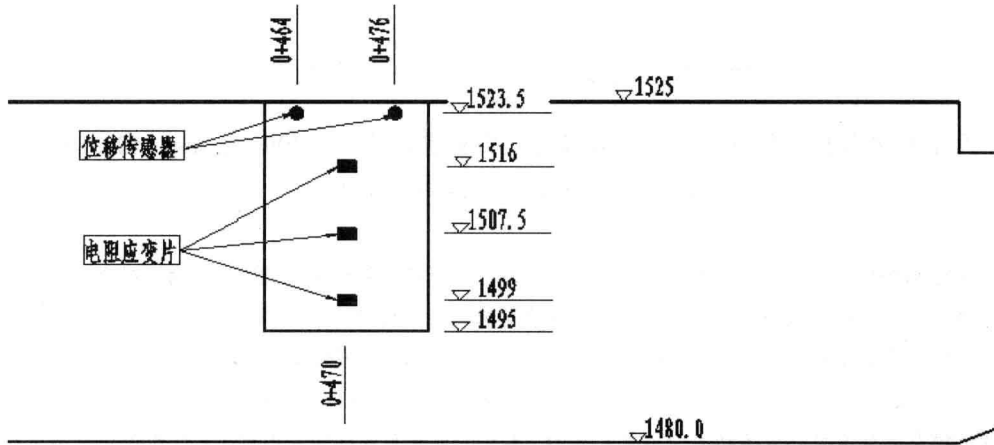


图 1 边墙动应力和动位移测点布置

3 边墙动力响应测试

3.1 边墙整体荷载特性

在水利工程中,水流的脉动压力、脉动流速以及引起的泄洪振动响应均可视作一个平稳的随机过程。在本试验随机数据的采集过程中,取采样频率 $f_s = 50\text{Hz}$, 相应的采样间隔 $\Delta t = 0.02\text{s}$, 样本容量 $N = 4096$, 采样时间长度 $T = 82\text{s}$, 采用北京东方振动与噪声研究所 DASP 数据采集与处理系统进行数据采集分析, 得到边墙整体荷载动力分布特性。

通过边墙各工况整体荷载测试图 2, 结果表明边墙的整体荷载均方差沿高程呈现逐步增加的趋势, 且随消力池中水深的增加, 这种变化趋势也越剧烈。均方差最大值出现在大坝校核洪水工况达到 $196.23 \times 9.8\text{kN}$ 。从典型整体荷载功率谱图 3 中看出, 整体荷载脉动能量集中在很低的频域内, 范围在 2.0Hz 以内, 属低频窄带分布。

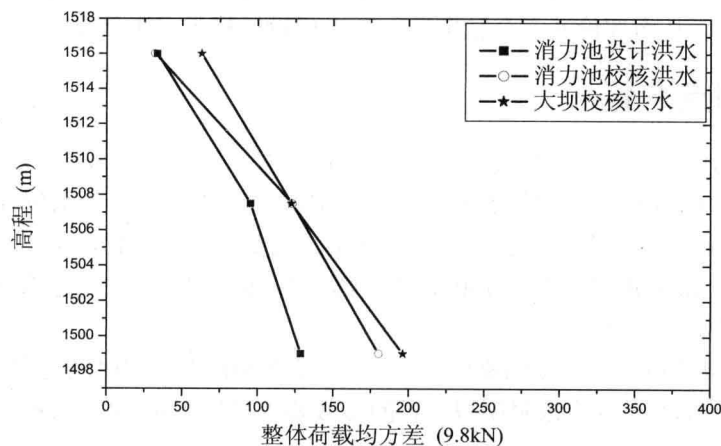


图 2 边墙整体荷载沿高程分布

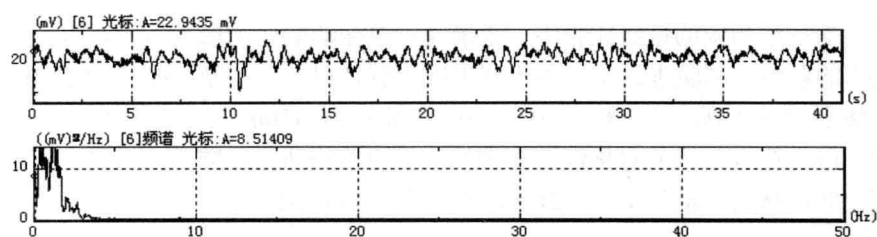


图3 边墙整体荷载时程线及功率谱

3.2 边墙动应力响应

动应力是消力池边墙流激振动反应的重要特征。针对边墙整体荷载动力特性,通过水弹性模型,测量了边墙在不同上下游水位的耦合动力响应。

动应力试验结果及大坝校核工况功率谱(见图4)分析表明:各工况下动应力沿边墙高程均呈先增后减趋势,均方差最大值出现在大坝校核洪水工况测点高程1507.5m处,最大值为0.394MPa。动应力的脉动频率较低,大于1Hz的脉动能量很少,主频为0.05Hz左右,属于低频窄带分布。

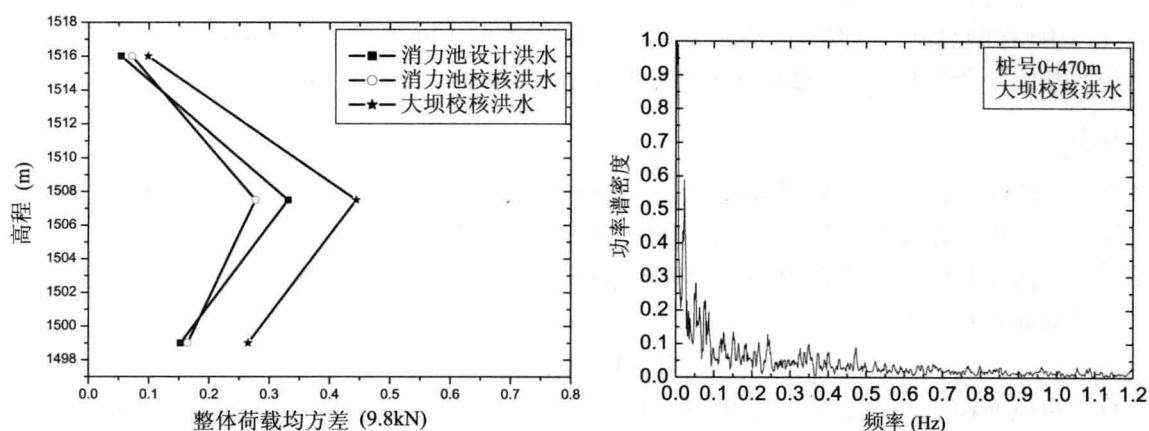


图4 边墙动应力分布及功率谱

3.3 边墙动位移响应

振动位移的分布应该是消力池边墙顶部为响应最大点,但由于受传感器安装的限制,本试验是通过布置在1523.5m高程的两个测点来测试的。动位移试验结果及大坝校核洪水位工况功率谱见图5。

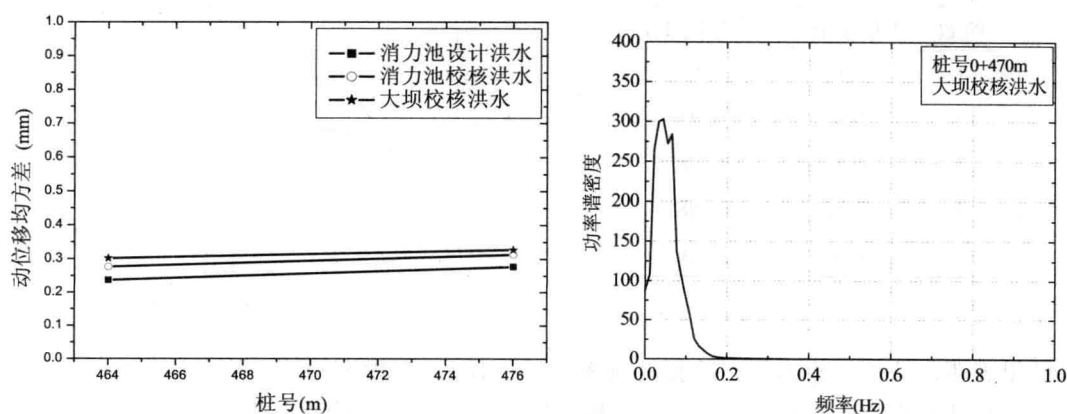


图5 边墙动位移分布及功率谱

由于泄洪振动位移响应的量级比较小,背景噪声对振动响应的影响较大,因此在试验测试结果分析中需要滤掉噪声的影响。试验进行了3种不同工况测试,得出:在测点高程1523.5m处,边墙动位移均方差在大坝校核水位时达到最大,桩号0+464m和桩号0+476m的动位移均方差基本相同,分别为0.301mm和0.327mm,符合结构的对称性分布规律。从边墙的动位移频谱图可看出,动位移脉动频率与动应力相似都比较低,脉动能量基本在0.2Hz以内,主频为0.1Hz左右。

4 边墙动力响应数值分析

在模型试验中,会由于各种条件限制而使布置的测点很少,比如在本次试验中,动应力响应只沿着程布置了一组共3个测点,动位移仅在顶部布置了2个测点,这样就难以全面反映结构的动力响应特征,而且模型试验本身和测试装置有其局限性也不能完全模拟结构的真实受力情况,因此,开展结构动力响应的数值计算方法研究是十分有必要的。

4.1 结构动力响应的有限元建模

该水电站边墙为混凝土结构,且顺水流方向每10m设一条结构缝,分缝的存在,使得边墙的振动具有独立性,因此在顺水流方向取单段墙体作为研究对象,即取10m长的边墙段进行分析。结合工程实际,模型中的地基面为全约束,分缝处墙体为垂直水流方向约束。

4.2 模态

模态的数值计算分干、湿两种情况进行,干模态就是结构在其模态分析时不考虑流体的影响。湿模态就是通常把动水压力当作一个附加质量的形式考虑流体的影响。

动水压力的计算公式一般采用修正的 Westergaard 公式^[3]计算,本文参照以往的工程和研究经验,将公式中的系数取为0.5,即

$$M = 0.5 \rho_0 \sqrt{h_0 l} \quad (1)$$

式中: M 为单位面积的附加质量; ρ_0 为水的密度; h_0 为水的深度; l 为计算点到水面的距离。

本工程边墙的模态分析采用大型结构动力分析软件 ANSYS, 运用有限元方法进行数值计算, 计算皆采用八节点三维块体单元, 计算时边墙混凝土材料密度取 2.4t/m^3 , 动弹性模量取 35GPa , 泊桑比取 0.167 , 计算结果见表1及图6。

表1 边墙模态 (前5阶)

阶数	左边墙	
	干模态(Hz)	湿模态(Hz)
1	11.14	7.45
2	29.83	19.41
3	30.86	20.98
4	37.12	25.88
5	50.81	33.26

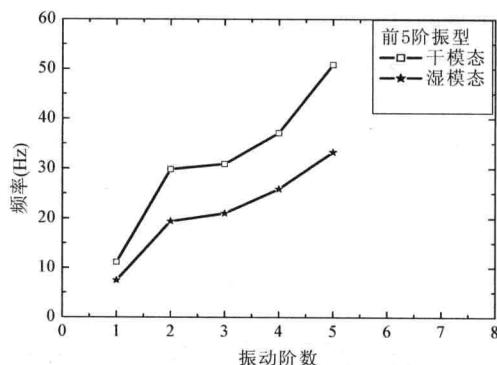


图6 前5阶模态频率

计算结果表明,边墙干模态第一阶振动频率为11.14Hz,湿模态的第一阶振动频率为7.45Hz,湿模态下移33%。对其他阶型的振频进行比较,湿模态比干模态大约下移都在30%左右,这主要是水体的附加质量对结构振动特性产生影响,降低了结构的自振频率。从典型整体荷载功率谱图3可以看出,整体

荷载的频率主要集中在 2.0Hz 以内, 两者相差很大, 基本不存在共振的可能性。

4.3 边墙动应力计算

将模型实测边墙整体荷载(图 3)换算成原型单位面积荷载的时间过程均匀加在边墙数值模型上, 计算出各工况边墙各部位的动应力及动位移。边墙因外侧为原河道, 可认为该侧仅受静水荷载, 两侧水流条件差别很大, 内侧拉应力大。

边墙动应力在各工况下计算结果(图 7)与试验值变化特征相同, 沿边墙高程均呈先增后减趋势, 在根部有一定的应力集中, 但未超过最大变化值, 无需处理。均方差最大值出现在大坝校核水位工况, 位置在桩号 0+470m, 高程 1503.02m, 数值为 0.11MPa。动应力最大值位置与均方差位置相同, 但是出现在消力池的设计洪水工况上, 达到 0.658MPa。考虑这是因为在该工况下边墙左侧河道的水位较低, 形成了边墙两侧的荷载差与其他工况相比更大一些, 内侧的水流荷载远大于外侧的静水压力, 使边墙内侧(消力池一侧)形成较大拉应力所致。

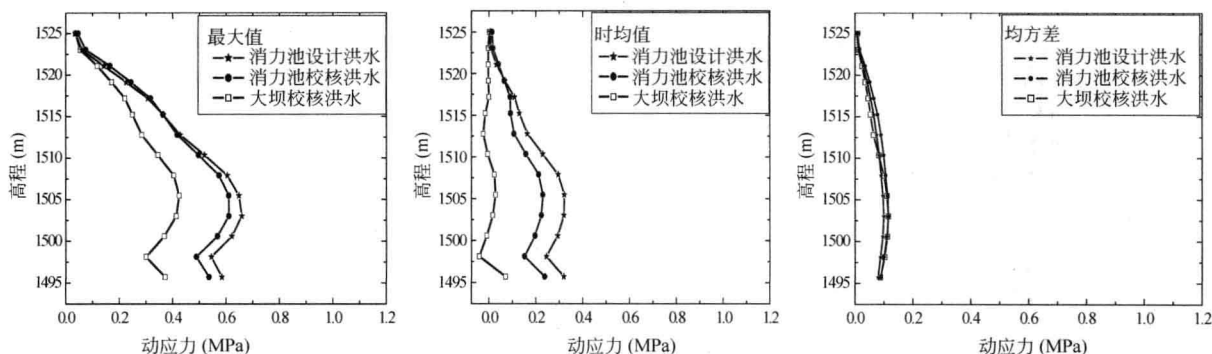


图 7 边墙动应力沿高程分布

混凝土在泄洪振动作用下的疲劳破坏问题, 至今还没有成熟的理论, 若静力条件下允许拉应力 $[\sigma]$ 取 1.56MPa, 按 0.4 倍的静力作为允许应力值^[4]。则泄洪振动的允许拉应力可取 0.62MPa。对于消力池设计洪水工况下最大动应力出现在距边墙底部约 1/3 高程, 达到 0.658MPa, 稍微“超标”。计算动应力脉动频率与实测值相似, 大于 0.4Hz 的脉动能量很小, 主频为 0.05Hz 左右。

4.4 边墙动位移计算

边墙各部位动位移, 计算结果见图 8。

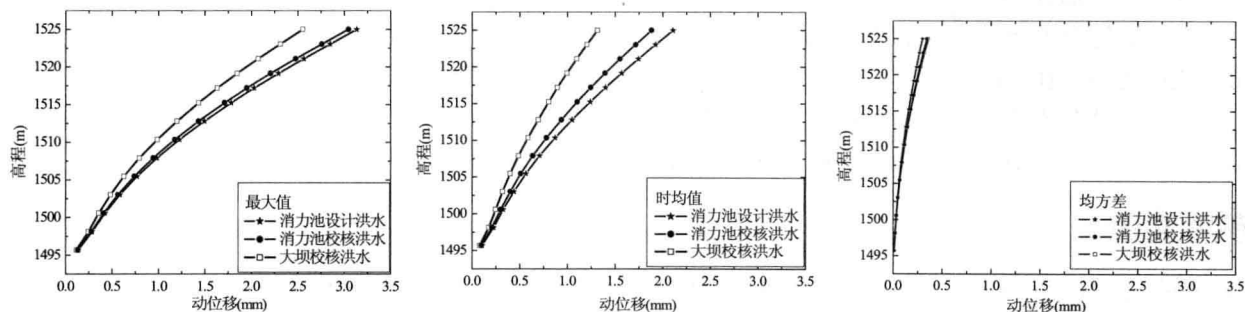


图 8 边墙动位移沿高程分布

经动位移计算得出, 在消力池设计洪水工况下动位移达到最大, 数值为 3.13mm, 在大坝校核洪水工况下均方差最大为 0.36mm。位置在桩号 0+470m, 高程 1525.0m (边墙顶端)。

计算动位移脉动频率与实测值相当,频率主要集中在 0.2Hz 以内,与边墙基频相差很大,基本不存在共振的可能性。

对于稳定性问题,至今还没有一个统一的标准,Meister 等在实验中取得的研究成果目前已为各个领域所采用^[5]。依据 Meister 感觉曲线,边墙顶部最大振动位移 3.13mm 时,频率在 0~0.2Hz 范围内处于相当感觉与强烈感觉区间。

4.5 边墙动应力模型试验数据与有限元计算结果对比

通过水弹性模型试验与有限元计算进行对比,可以互为校核,增加为实际工程提供的可靠性。

从图 9 中模型试验和数值计算的结果上看,在各工况下两者的动应力均方差走势基本一致,均呈先增后减趋势,在高程约 1505m 范围达到最大,但模型实测值均比计算值要稍偏大,这是由于模型所测的应力不含有重力效应,这里将重力产生的压应力效应视作安全储备。试验与计算的动位移均方差值十分相符,说明了用数值模型进行消力池边墙动力分析是可行、可靠的。

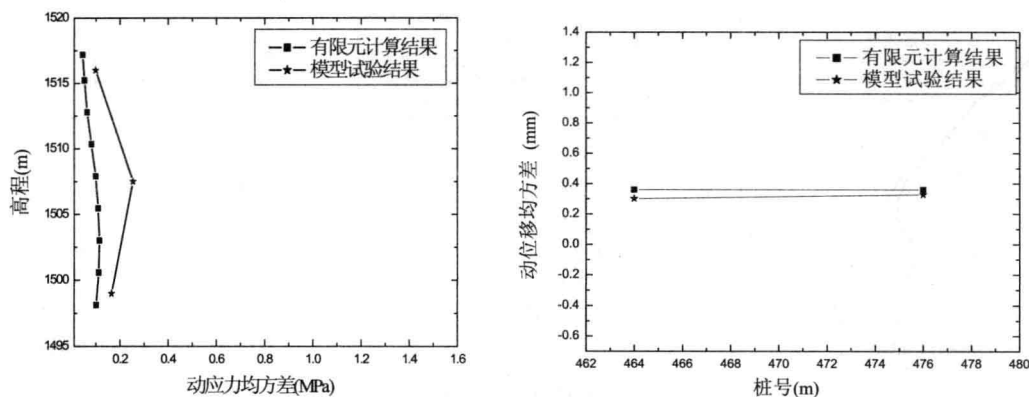


图 9 模型试验与数值计算结果对比

5 结论

本文基于某水电站消力池防护结构模型试验,分析了消力池边墙水动力荷载响应,主要得出以下几点结论:

(1) 关于动应力问题,边墙只在消力池设计水位工况下局部最大动应力“偏大”。因此,在进行结构设计时应采取适当的措施予以加强。而动位移问题,至今还没有一个统一的标准,通常以 Meister 曲线为依据,边墙顶部最大振动位移 3.13mm,频率在 0~0.2Hz 范围内处于相当感觉与强烈感觉区间。

(2) 通过有限元动力计算与振动响应频率特性分析,边墙的主要振动成份为低频强迫振动,水流脉动荷载优势频率在 0.1Hz 以下,与边墙结构的自振频率 11.1Hz 相距很大,不会发生共振。

(3) 通过对边墙流激试验与数值计算结果对比,得出动应力均方差两者曲线走势相同,动位移均方差值相符,从而说明了计算结果的可靠性,也可为工程设计提供参考依据。

参考文献

- [1] 焦爱萍,刘沛清,刘宪亮. 基于计算流体动力学的不同流量比两股射流水垫塘的消能特性研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 238-244.
- [2] 杨敏,崔广涛. 水垫塘底板稳定性控制指标的探讨[J]. 水利学报, 2003(8): 6-10.
- [3] 居荣初,曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京:地震出版社, 1985.
- [4] 徐国宾,尹伟波,练继建,等. 糯扎渡水电站溢洪道泄槽流激振动试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 24-27.
- [5] [日]伯野无彦. 土木工程振动手册[M]. 李明照,等,译. 北京:中国铁道出版社, 1992.

两河口电站进水口事故闸门水力荷载特性研究

张文远 张 东 杨 帆 章晋雄

中国水利水电科学研究院水力学所, 北京复兴路甲 1 号, 100038, zhangweny8@163.com

摘 要: 通过模型试验, 对电站进水口事故闸门动水闭门门体水力荷载及甩负荷工况门体水力荷载进行研究, 测量分析结果表明: 事故闸门依靠门顶水柱可以动水关闭; 针对机组甩负荷工况, 水击压力会造成闸门水平推力出现负值, 即在没有限制措施情况下闸门将出现顺水流方向摆动, 闸门及引水洞运行存在安全隐患, 同时竖向荷载及持住力呈现周期性衰减波动, 约在波动 4 个周期后趋于稳定, 水击压力首次冲击闸门时产生一个约占闸门门重 25% 的上托力, 闸门不存在上浮危险。有关实验数据对研究电站进水口快速事故闸门设计有重要参考价值。

关键词: 两河口水电站; 快速事故闸门; 电站进水口; 水力特性

1 引言

进水口事故闸门是水轮发电机组及引水管道的重要保护设备, 当某些情况机组甩负荷或发生故障时, 需要关闭孔口快速事故闸门, 截断水流, 防止事故扩大。对于机组甩负荷工况, 快速事故闸门关闭过程中容易遭受压力波的冲击而使其上升脱槽^[1], 因此全面掌握电站进水口快速事故闸门的工作特性, 尤其是在机组甩负荷工况压力波对事故闸门的影响, 防止闸门的振动, 保证发电引水系统的安全运行具有重要意义。本文以两河口水电站发电引水洞进水口快速事故闸门为研究对象, 对事故闸门的水力特性进行了试验研究。

2 工程概况

两河口水电站引水发电建筑物主要由电站进水口、压力管道组成。电站引水发电系统从进水口到水轮机组的流道长度约 360m, 引水管道直径 7.5m, 机组最大引水流量 $248.6\text{m}^3/\text{s}$, 机组弃负荷时间 11.5s。每台机组进水口顺水流方向分别布置四孔拦污栅、四孔挡水叠梁闸门、一孔检修闸门、一孔快速事故闸门。进水口底板高程 2765.0m, 挡水叠梁闸门孔口尺寸 3.8m×42m(宽×高)。单层叠梁门门高 14.0m, 取水水头 25.0~39.0m。进水口快速事故闸门孔口尺寸 6.0×7.5(宽×高-设计水头 100m), 为平面滑动闸门, 利用垂直式液压启闭机通过拉杆操作。快速事故闸门平时置于孔口上方 1m 位置, 必要时迅速关闭, 截断水流。两河口水电站引水发电系统总体布置见图 1。

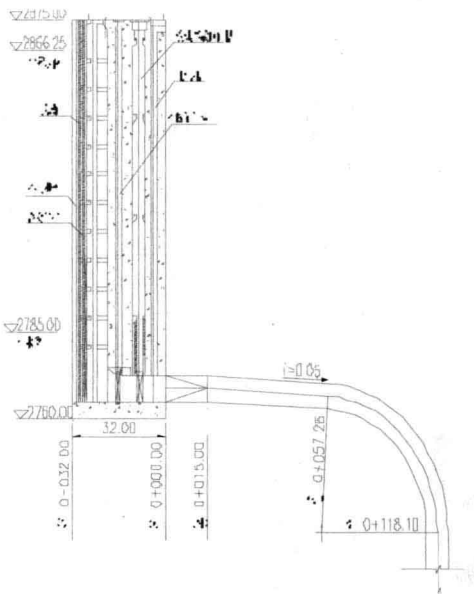


图 1 电站进水口纵剖面图

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51279216)。