

· 成果简介 ·

西部能源重大研究计划重点资助项目 “西部高拱坝抗震安全前沿性基础科学问题研究” 取得重要进展

陈厚群^{1*} 纪军² 刘涛² 李万红²

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

[关键词] 高拱坝, 地震动输入, 非线性动态分析, 全级配混凝土动态抗力, 高性能计算技术

我国的水能资源位居世界之首, 水电作为可再生清洁能源, 是集国土整治、河流开发、防洪抗旱、优化能源结构、地区经济振兴、扶贫、生态改善于一体的可持续发展工程。在应对 2020 年非化石能源占一次能源消费的比重达到 15% 的挑战中, 资源丰富、技术成熟、可大规模开发的水电更是主力军。在充分重视移民安置、生态和环境影响的前提下, 积极有序的进行水电工程高坝建设, 切合我国国情, 为社会经济发展所急需, 已成为我国基础设施建设中不可或缺的重要组成部分。

高坝大库在调节性能好、装机容量大、综合效益高的大型水电工程建设中, 具有无可替代的重大作用。随着全球环境意识和可持续发展要求的日益增强, 国际社会对高坝大库功能和作用的认识正不断深化。当前, 我国正在集中 80% 水能资源而又难以避让的西部强震地区, 修建一系列前所未有的 300 m 级高拱坝。高坝大库一旦遭受强震破坏将导致不堪设想的严重次生灾害后果。因此, 高拱坝抗震安全是亟待解决的工程技术难题和学科前沿课题。

为此, 国家自然科学基金委员会重大研究计划“西部能源利用及其环境保护的若干关键问题”于 2006 年设立了重点资助项目“西部高拱坝抗震安全前沿性基础科学问题研究”, 由中国水利水电科学研究院陈厚群院士主持, 河海大学、西安理工大学等 3 个单位共同承担, 以亟待解决的工程问题为背景, 针对“防止高坝在极限地震下溃决”的战略重点, 研究

以下基础性关键技术问题:

(1) 抗震设防水准框架及其相应可操作的性能目标, 以及合理选择场址相关地震动参数及其输入机制。

(2) 计入近域和远域地基各类实际地质和地震条件影响的、高拱坝-地基-库水 3 维体系的数学模型及其非线性波动问题和破坏机理研究的有效求解方法。

(3) 全级配大坝混凝土动态抗力性能试验及应用 3 维细观力学方法及 CT 扫描技术对其损伤和破坏机理的研究。

(4) 高性能计算技术在高坝大库抗震安全中的应用。

1 项目研究的主要特点

(1) 紧扣西部能源利用和环境保护主题: 我国居世界首位的水能资源 80% 集中于西部, 是西部的优势资源, 水电作为可再生清洁能源是当前我国应对气候变化, 承诺环保减排的主力, 而调节性能好的高拱坝是西部水电工程的主要坝型。

(2) 追踪学科前沿以解决工程急需难题: 我国是世界震灾最严重的多地震国家, 西部最为突出, 在强震区建超高拱坝, 迄今世界少有先例, 缺乏工程实践和震害实例可资参考, 必须对传统理念、思路、方法有所突破, 力求创新, 以应对一系列高难技术问题的严重挑战, 有助于对高坝抗震安全学科发展的推动。

* 中国工程院院士。

本文于 2010 年 9 月 3 日收到。

(3) 体现学科交叉,综合评价工程抗震安全:强调对高拱坝抗震安全评价,必须基于地震动输入、结构响应、材料动态抗力3个相互配套方面综合分析的基本理念,以改变长期来对结构地震响应的研究日益精细,而对地震动输入和结构抗力研究相当粗放的“两头大、中间小”的现状。加强了对地震动输入、材料抗力有关的地震学、材料学等交叉学科的研究。在研究中引入了高性能并行计算、CT扫描等高新技术。

(4) 研究内容紧密结合实际工程,突出战略重点:针对当前我国西部强震区高坝大库工程“在遭受极限强震时不发生库水失控下泄的严重次生灾害”的战略重点,研究内容和目标均来自工程中亟待解决的共性和基础性关键技术难题。大部分研究成果已在众多高拱坝工程的抗震设计及汶川地震后抗震安全复核中被广泛采纳应用,给震后正修编中的水工抗震设计规范提供了依据。

(5) 依托“产、学、研”相结合创新团队:科研院所、高等院校与工程设计部门有机协作,在统一规划下,既有分工负责和各自特色、又交叉融和及相互配合衔接,资源设备共享,优势互补。坚持及时交流制度化,如:每年项目负责人要进行巡访协调、各参加单位轮流负责主办学术交流会并编印当年研究成果论文汇编等,初步形成相对固定、长期协作的“产、学、研”相结合的创新团队。

(6) 广泛地开展了国际和国内学术交流与合作:4年来课题组成员在国内外重要学术刊物和学术会议上发表论文125篇,其中已被SCI、EI收录共48篇;已出版专著2部,已签约出版总结性专著1部,待出版专著3部;获省部级科技进步奖二等奖1项;申请国内专利2项;培养博士后、博士、硕士研究生共33名。

在国际学术会议上作了8次特邀报告和21次分组报告,包括在2008年首次在我国召开的、有各国4000多名代表参加的第14届世界地震工程大会(14WCEE)上,项目负责人作为“大坝抗震”分会组织者和主持人之一,获14WCEE大会主席颁发的奖牌;先后应土耳其大坝安全协会(由土耳其国家科学委员会负担全部费用)、巴西大学和巴西电力公司邀请,就本项目研究成果作特邀报告,并在冰岛2009 HYDROPOWER国际学术大会和国际大坝委员会(ICOLD)多次年会上作学术报告;汶川地震后,参与组织ICOLD多国专家到现场考察大坝震害;以基于监测资料和科学论据,在 *International Water Pow-*

er & Dam Construction 国际刊物发表论文回应了曾刊登在 *Science News* 上的国内外对“紫坪铺水库引发汶川大地震”的不实议论,使 *Science News* 又重新报导了我们的论述,得到本领域国际学术界的重视。

于2006、2007、2009年分别组织了第一、二届“全国水工抗震防灾学术交流会”和“全国大坝抗震防灾高级学术研讨会”,分别在《水力发电学报》和《水力发电》杂志出版专刊及由水利水电出版社出版论文集。

2 项目研究取得的创新性进展

经过课题组4年的努力,该项目取得的重要研究进展可从以下4个方面进行综述。

2.1 在高拱坝坝址地震动输入方面

(1) 提出的对重大高坝工程,除按设计地震进行抗震设计外,还应校核“最大可信地震”下“溃坝”的抗震设防水准框架,汶川地震后,已在国家发展与改革委员会文件要求中得到体现;(2) 提出以基于与场地设计峰值加速度相应的“设定地震”求得的“坝址场地相关设计反应谱”替代现行规范中的标准设计反应谱和“一致概率反应谱”;(3) 在对美国“新一代衰减关系(NGA)”分析研究基础上,探讨并建议了适用于我国大坝抗震设计的地震动加速度衰减关系,以替代通过烈度转换的地震加速度和反应谱衰减关系;(4) 为适应高坝体系地震响应非线性动力分析的需求,研发了基于渐进功率谱生成幅值和频率都非平稳的人工模拟地震动加速度时程的方法,并且回归了较适合我国国情的目标渐进功率谱与震级和距离的关系,以替代现有存在阻尼取值矛盾的多重滤波方法和基于日本板块间地震的目标渐进功率谱与震级和距离的关系;(5) 研发了基于能反映近断裂大震地震动特征的“随机有限断层法”软件,并通过实际工程的应用,验证了其可行性,以替代目前采用的有很大不确定性的、以重现期为10 000年的地震作为“最大可信地震”的办法;(6) 澄清了当前对坝址地震动输入机制在概念上缺乏共识和存在混淆的现状,并提出了相应建议;(7) 有关水库地震的研究成果,汶川大地震后,在对解释和澄清国内外有关“汶川地震是否与紫坪铺水库和三峡工程水库蓄水有关”的问题中得到了应用,受到了国内外的重视。

总之,针对当前我国高拱坝抗震设计中的场址地震动输入中存在的一系列共性和基础性的关键技

术问题,就适当确定设防水准框架、合理选择地震动参数和正确理解输入机制等方面,进行了较全面系统的深化研究。分析和澄清了工程应用中存在的诸多基本概念上的混淆,提出和探讨了解决的途径及其理论依据,为坝址地震动输入提供了一整套紧密结合我国国情和高坝工程特点的、更合理和可操作的新的思路、方法和自主研发的应用软件。成果在我国西部众多重大水电工程的高拱坝工程抗震设计中及汶川地震后重要大坝工程抗震复校核中已都被应用,并为水工抗震规范的修订提供了基础性资料和科学依据。

2.2 在高拱坝-库水-地基体系地震响应分析及抗震安全性评价方面

(1) 建立了能同时考虑拱坝、地基和库水间的动力相互作用、坝体内横缝间的往复开合、地基的质量和振动能量向远域地基逸散的辐射阻尼、邻近坝体的近域地基的地形和包括潜在滑动岩块在内的各类地质构造、沿坝基地震动输入的空间不均匀性等因素影响的高拱坝体系地震响应分析模型;(2) 对包括人工透射边界和粘弹性阻尼边界的高拱坝开放体系,研发了其地震响应的时域显式非线性动态求解方法和软件系统;(3) 基于动接触理论建立了拱坝坝体横缝、坝基面、坝肩岩体潜在滑块的滑动面的接触界面模型,以替代现行不能精确满足接触条件和切向滑移状况的、刚度系数的确定有任意性的接触单元法,提出并实现以变形为核心的拱坝抗震稳定性分析方法,以替代不能反映实际状况的传统的“刚体极限平衡法”;(4) 提出了以拱坝体系地震位移响应突变确定其抗震稳定性和整体失效溃决的评价定量准则的新思路和方法,以替代不能反映拱坝体系实际地震性状的基于安全系数的传统准则。

2.3 在大坝混凝土动态抗力方面

(1) 结合实际工程的大坝混凝土材料宏观试验研究:研制不同试验设备和加载方式,对全级配和湿筛混凝土试件进行静、动态弯拉试验;比较全级配和湿筛混凝土试件差异及干湿条件、不同龄期影响,确证静态预载对动态弯拉强度影响,从破坏机理上对试验结果提出理论解释;开展包括软化段的混凝土受拉本构关系全过程的试验研究;开展混凝土试验中的动态声发射检测,验证在轴向拉伸试验中存在的凯塞(Kaiser)效应。

(2) 开展全级配混凝土3维细观力学动态分析研究:探索了“数字混凝土”动态抗力研究新思路:(i) 研发混凝土试件作为由骨料、水泥砂浆及两者界

面3种复合介质的3维细观力学数学模型及其有限元网格剖分;(ii) 用蒙特卡罗法,对多级配骨料空间分布位置及各介质抗拉强度和弹性模量在试件空间的随机投放,提出了“被占区域剔除法”,使骨料随机投放能满足实际配合比的要求;(iii) 借鉴“复合材料多尺度算法”理论,研发求解最细骨料和砂浆作为双相复合材料的等效力学参数;(iv) 研究了不同骨料形态模拟的影响;基于试验资料,引入混凝土强度和弹性模量的应变率效应系数和损伤变量演化模型;(v) 在时域中对试件的抗折强度进行了非线性动态分析,对数值分析和试验结果进行了相互印证。

(3) 开展应用CT技术探索混凝土内部破坏机理的研究:(i) 系统探索和解决混凝土CT试验时的试验技术问题;(ii) 研制了与医用CT配套的便携式动态拉、压试验的专用设备(已申请专利),解决了混凝土试件动态加载的一系列关键技术问题;(iii) 进行了静、动态的拉、压试验全过程CT图像实时扫描;(iv) 研究了混凝土开裂损伤的CT图像识别和分析技术,进行了其细观裂纹形态特征和损伤的定量分析。揭示了静、动加载下,内部结构细观破坏形态的差异,印证了对破坏机理的解释;(v) 应用3DMAX软件完成了能显示混凝土空间裂纹形态及其扩展过程的重建三维裂纹图像和动画显示。

2.4 在高拱坝地震响应分析的高性能并行计算方面

为解决高拱坝地震动分析中计算工作量过大的瓶颈问题,开创了在高坝抗震领域应用的并行计算环境:(1) 构建了以联想深腾1800高性能服务器、千兆以太网交换机、5个各有两个主频为3.0GHz的CPU的计算节点组成的微机群并行计算平台;(2) 依托中国科学院梁国平教授的有限元自动生成系统计算程序语言(FEPG)及其基于区域分解法生成的并行有限元计算程序(PFEPG),研究了相应并行计算中动力显式计算格式、动态接触、人工透射边界和粘弹性边界等问题的处理方法,完成了适应高拱坝地震响应分析的并行计算软件的研发。通过对实际工程的应用,验证了所开创的并行计算软硬件平台的显著效果。

3 思考与启示

该项目全面完成了计划任务书的研究内容,达到了原定总体研究目标,取得了一系列创新性的研究成果,进展突出。如下几点体会将有益于我们今后更好地组织与管理国家自然科学基金重点资助

项目:

(1) 紧密结合工程建设中的重大需求,重视提炼共性和基础性科学问题,突出重点,开展系统深入的研究,勇于突破传统、注重学科交叉和高新技术应用,是工程学科取得高水平研究成果的重要保证。

(2) 重视工程学科的共性和基础性研究成果在工程实际中的推广应用,以用为本,充分发挥作用,在实践中得到检验和提升,是充分发挥工程学科基础性研究成果作用的根本。

(3) 强调围绕学术前沿问题开展原创性研究工作,加强国际交流与合作,敢于应对学术争论,是提高我国在国际学术界的影响并发挥更大作用的前提。

(4) 项目实施中,科研院所、高等院校与工程设计部门有机协作,充分发挥“产、学、研”相结合创新团队的优势;在统一规划下分工负责、相互配合衔接,资源设备共享,优势互补;坚持及时交流有机协调制度化,是工程学科项目成功实施的保障。

FUNDAMENTAL FRONTIER PROBLEMS FOR SEISMIC SAFETY EVALUATION OF HIGH ARCH DAM IN THE WESTERN CHINA

Chen Houqun¹ Ji Jun¹ Liu Tao² Li Wanhong²

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038;

2 Department of Engineering and Materials, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Key words high arch dam, ground motion input, nonlinear dynamic analysis, dynamic resistance of full-aggregate concrete, high performance computing technique.

· 资料 · 信息 ·

上海硅酸盐研究所在介孔碳材料的应用与合成研究方面取得新进展

在国家自然科学基金等的资助下,中国科学院上海硅酸盐研究所施剑林课题组首次发现了介孔碳材料对人体内毒素“胆红素”具有很好的吸附性能和良好的血液相容性,并提出介孔碳材料作为血液净化用吸附剂的设想。英国皇家化学会 *Highlights in Chemical Biology* 以 *Cleaning blood with carbon* 为题对该研究小组的科研工作进行了报道。

血液灌流是一种临床治疗血液疑难疾病和降低尿毒症患者血液中毒素分子浓度的常用手段。传统的活性炭吸附剂由于孔径小且分布不均一,所以无法对中分子和大分子毒素进行有效吸附而去除。普通介孔碳和介孔空心碳球对胆红素的吸附速率和饱和吸附容量均明显高于医用活性炭。溶血实验表明,介孔碳具有良好的血液相容性。如果介孔碳材料作为血液灌流用吸附剂应用于临床,则灌流时间大大缩短,并显著降低治疗时间,减少病人的痛苦。

同等条件下,介孔碳吸附剂用量明显少于活性炭吸附剂用量,从而有助于灌流吸附柱的小型化。由于血细胞大小为几个微米到十几个微米,医用活性炭颗粒大小约为 0.5—0.8 毫米(500—800 微米)左右,因此血细胞可以在全血灌流中从吸附剂颗粒间隙顺利通过。但是普通介孔碳颗粒大小一般为几个微米,介孔空心碳球尺寸为几百个纳米,假如装入吸附柱用于全血灌流时,将造成血细胞无法通过。

针对全血灌流需要,该课题组合成了毫米级介孔碳球,碳球表面光滑,并具有 6—11 nm 的贯穿介孔孔道。体外胆红素吸附试验结果显示,这种毫米级介孔碳球对胆红素饱和和吸附量是医用活性炭球的两倍多。溶血和凝血实验结果表明,这种毫米级介孔碳球具有良好的血液相容性。

(化学科学部 供稿)