

文章编号:1672-3031(2018)05-0322-09

水工混凝土结构抗震研究60年

陈厚群

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 本文简要介绍了中国水利水电科学研究院60年来在水工混凝土结构, 主要是大坝的抗震研究方面的进展。回顾了其历经“启蒙”、追踪世界前沿的“跟跑”和“并跑”三个发展阶段。概述了主要研究成果, 诸如: 坝址的地震动输入及其场址相关地震动参数的确定; 应用高性能“云计算”技术, 对坝体-地基-库水体系地震响应及其基于损伤力学的损伤破坏过程的非线性并行计算分析; 极端地震下地震灾变的定量判别准则的确定; 采用三向六自由度地震模拟振动台进行坝体-地基-库水体系动力模型试验; 大坝现场试验和地震动监测; 大坝混凝土全级配试件包括损伤本构关系的动态特性试验及应用三维细观力学分析和CT技术研究其内部开裂状态; 编制水工建筑物抗震设计国家标准等。最后, 对常规的抗震设计理念和方法提出了改进建议。

关键词: 混凝土水工结构; 大坝混凝土动态特性; 坝址地震动输入; 地震响应; 抗震设计规范; 常规设计改进

中图分类号: TV331

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.001

1 引言

1959年广东省河源县新丰江水库蓄水后, 频繁发生地震。这是一个库容115亿 m^3 、坝高105 m的大型混凝土大头支墩坝工程。由于坝址的基本地震烈度仅为Ⅵ度, 坝体设计并未考虑抗震设防。万一坝体失事, 对下游影响很大。水电部门领导决定, 按照可能发生Ⅷ度地震的要求, 立即在大坝下游面开敞的支墩间修建支撑墙以抗震加固。当加固工程接近完工时, 1962年3月库区发生6.1级的强震, 震中烈度为Ⅷ度。由于对大坝及时加固, 大坝整体稳定, 仅在一些坝段高程108 m附近发生上下游贯穿的裂缝。为此, 震后又做了在支墩腹腔内回填一定高度混凝土的二期加固, 以进一步增加坝体的整体稳定性, 并对上部裂缝进行化学灌浆及上游贴防渗面板等处理。大坝正常运行至今, 成为迄今世界上少有的、因及时采取工程措施而成功减轻水库地震灾害的范例。

当时, 我国对大坝抗震的研究还很少。时任副院长黄文熙先生从我国是多地震国家, 今后我国大坝建设会随经济发展而加速的国情, 敏锐觉察到大坝抗震安全研究的重要性。在和结构材料所领导研究后, 决定要在所内建立抗震组, 指定要本人负责筹建, 并立即结合新丰江大坝的抗震加固开展研究。从此吹响了我院混凝土坝抗震研究的进军号角。

为确保新丰江大坝的抗震安全, 在前后长达4年的时间里, 集中全国各有关部门力量, 进行了前所未有的广泛而深入的研究, 从此开创了我国大坝抗震安全系统研究的先河。结构所的抗震组, 也正是依托积极参与其中的很多工作而开始逐步成长的。

60年来, 我国在震区混凝土高坝的建设发展迅速, 正是在这样的背景下, 在部、院领导的培育和支持下, 在与国内外的协作中, 我院的混凝土坝抗震研究, 从结构所的抗震组、抗震防护所的结构抗震室, 发展到现今的工程抗震研究中心, 取得了一批满足国家水利水电工程抗震设计急需、追踪学科发展前沿的科研成果, 逐步形成了在国内外大坝工程抗震领域中有一定影响的科研基地和团队。

在整个发展过程中, 始终激励我们团队的, 是对保障高坝抗震安全的国家急需和社会责任的理

收稿日期: 2018-06-19

作者简介: 陈厚群(1932-), 江苏无锡人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构研究。

E-mail: chenhq@iwhr.com

解：匮乏且时空分布不均匀的水资源的调蓄利用、以煤为主的能源结构的急需改善、居世界首位储量的水能资源的开发等我国国情的迫切需求，赋予了我国高坝大库建设在防洪、发电、供水、粮食和生态安全等方面无可替代的重要作用；我国是全球蒙受地震灾害最为严重的多地震国家，高坝大库建设都位于西部强震区，必须面对难以避让的抗震安全的严峻挑战；万一溃坝失事关系到人民群众生命财产安全、经济发展、社会稳定和国际影响的大局，可能导致不堪设想的严重后果。

基于在成长过程中的不断探索和总结，逐步厘清和形成了我们在科研工作中始终坚持的基本理念：一是突出工程观点，始终把“为工程服务”作为研究工作的出发点和落脚点；二是强调任何工程结构的地震安全性评价，都应包括对地震动输入、结构地震响应、结构抗力这三个不可或缺且相互配套要素的全面综合评价；三是重视实践检验，要始终坚持“实践是检验真理的唯一标准”的原则，科研成果力求通过室内外的试验和现场实测进行验证，并接受震害实例和强震监测的检验；四是提高自主创新能力，在借鉴、吸收和消化相关交叉学科的科研成果的基础上，进行集成和再创新，自主研发所有主要的分析软件，并敢于突破陈规，开拓新思路。

为庆贺我院建院 60 周年，应邀约，不揣冒昧，就 60 年来我院对混凝土坝的抗震研究，试作一个全面的概要回顾和展望。

2 征途中 3 个阶段跨越 4 个台阶的回顾

回首我院混凝土坝抗震研究的科研征途，大致可以划分为 3 个阶段，每个阶段大致各占 20 年左右。其间，沿着“结合国情、跟踪前沿”的方向，先后跨越了若干台阶，标志了我们的科研工作，从“启蒙”、“跟跑”、“并跑”到“向往引领”的历程^[1-3]。

2.1 边干边学摸索探路的启蒙阶段 第一阶段是从 1959 年在结构材料所开始组建抗震组，到 1977 年“文革”刚结束的年代。这段时期，对水工抗震这门边缘学科，由于对其了解极少，是处在边干边学摸索探路的启蒙阶段。

开始结合新丰江大坝的加固，限于在刚性地基的假定下，作为二维体系，采用电磁激振器激励空库的单个坝段，求得其主要低阶振型特性后，用振型分解反应谱法求解其地震响应。以后结合建于狭窄河谷中 147 m 高的刘家峡混凝土重力坝工程，为考虑其各坝段间的相互作用，首次探索了三维结构空间模态的测试技术。为在模型中模拟库水与坝体间的流固耦合作用对坝体动力特性的重要影响，需要测定满库时的坝体振型特性。由于试验中只能采用天然水体模拟库水。为此，为满足相似律要求，我们和北京橡胶六厂协作，研发了容重与混凝土相同，而弹性模量远较混凝土低、且能防水的加重橡胶，作为水弹性试验材料，已在国内不少研究单位和高校的试验中广泛应用至今。这类材料对应变量测的局部刚化及对温度敏感等影响研发了补偿措施。这些都使我们的抗震模型试验取得了一个新的突破。

在坝体地震响应的分析方面，仍局限于基于结构力学平截面假定的二维坝段空库振型求解。但在黄文熙先生的指引下，已开始了对刚兴起的电子计算机的应用和编程进行了探索。此外，为了从用振型分解反应谱法进展到直接输入地震动时程求解结构地震响应，在各级领导的支持下，在国内首次建置了引进的可以模拟地震时程输入的电磁振动台。参与了由中国科学院工程力学研究所主持的，在新丰江大坝加固前后，基于地脉动的实测坝体基本振型的现场试验；并开始了在坝体设置强震台站进行监测的探索。1966 年邢台地震后，对震区水利工程进行了现场震情调研。

在“文革”前的启蒙阶段初期，在边干边学中开始了对混凝土大坝抗震研究的全方位探索。当时全国正处于“以阶级斗争为纲”、极左思潮日益高涨期，从“三面红旗”、“反右倾”到“四清”，各类政治运动陆续不断，实际能用于科研的时间并不多。到“文革”时期，更达到了极点，单位被解散、人员全下放，设备遭拆走，科研业务完全中止。

邢台地震后不久，在“保卫毛主席、党中央和京津地区抗震安全”的要求下，我作为我院遭解散后待下放的留守人员，在长达十年的“文革”期间，有幸还能断续地进行了一些抗震科研工作。包括：

运动初期参与了京津地区一些大坝工程的抗震复核和山东地震中一些土坝的震害调研。到运动进入“斗、批、改”时期，又基于新丰江水库地震和大坝抗震加固研究的成果，负责组织有关单位，共同完成了首次提交国际大坝会议论文的任务，得到了国际学术界的关注。在当时的国家基本建设委员会抗震办公室统一组织领导下，负责组织有关单位，共同编制了我国首部《水工建筑物抗震设计规范(SDJ 10-78)》。1975年在参加水电部对海城地震灾区工程的慰问团之际，对海城地震中水利工程的震情作了粗略调查。1976年参加了内蒙和林格尔的水利工程的震情调研，特别是参加了在希腊雅典举行的，通过投票接纳中国为国际大坝委员会会员的国际大坝委员会大会，及会后对南斯拉夫的姆拉丁其高拱坝工地的考察。1975年参加了由国家地震局组团的在加拿大举行的国际诱发地震会议和会后考察访问。

在“文革”中科技界一片萧条落寞的情况下，水科院已遭解散期间，水工结构抗震的这些断续的科研活动，标志了在这个启蒙阶段，“文革”前刚起步不久的我院混凝土坝抗震科研工作，在长达十年的“文革”中并未完全中断。

2.2 乘改革开放东风的“跟跑”阶段 第二阶段是1978年到1997年的历程。在“文革”中被解散的水利水电科学研究院在1978年又恢复重建，并新成立了抗震防护研究所。沐浴在改革开放东风中的科研氛围已生机盎然，科研条件陆续改善。随着我国高坝建设的进展，我院的水工混凝土结构抗震研究，紧密结合实际工程抗震设计的需求，在应用基础理论、结构地震响应分析方法和计算程序的掌握、结构动态模型试验和大坝现场测振的开展，坝体强震动监测、水库地震研究等开展全方位的科研活动。完成了创建水工结构抗震研究的基本队伍和基地的任务，取得了一系列具有里程碑意义的进展。

1982年我院开展了由张光斗先生和国际知名权威美国加州大学伯克利分校克劳夫(R. Clough)教授领衔、由我所具体负责的为期近20年、在两国5个拱坝现场测震的中美政府间科研合作协议项目^[4]。部分现场试验成果获得了国家科技进步二等奖。1985年经部批准，建置了以引进大型三向六自由度地震模拟振动台为核心的结构抗震试验基地，该振动台在美国国家科委的报告中，被评为：“世界上最好的混凝土坝抗震模型试验设备”^[5]。建成后已为诸多水利水电工程、以及包括核电站核岛设备、大型储油罐、高层建筑、高压电器等进行了抗震试验研究。这些科研成果，使我院水工混凝土结构抗震的室内外试验技术跨上了一个新的台阶。

在此阶段，我们完成了《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5973-1997)和(SL 203-97)编制工作。实现了混凝土坝抗震计算分析从基于“拟静力法”转向动力法的跨越。同时又争取到了由我院主持的“九五”国家重点科技攻关“300 m级高拱坝抗震关键技术研究”项目，自主研发了更完善的混凝土坝地震响应动力分析程序。该程序基于线弹性有限元法、同时计入诸多工程实际条件、把坝体-地基-库水体系在时域内作为开放的波动问题求解，并在混凝土高坝工程抗震设计中被普遍推广应用，成果再次获得国家科技进步二等奖。使我们在混凝土高坝地震响应的动力分析方面，也跨上了一个新的台阶。

试验和分析两个台阶的跨越，标志了我国混凝土坝的抗震研究，已开始瞄准学科发展前沿、跟上国际先进行列的步伐。

此外，在此期间，我院在工程抗震领域，积极参与了国内外的学术交流活动：参加了引进的结构分析的商业程序SAP的学习培训；深入开展了可靠度设计理论的研究；先后多次派出人员到国外短期工作、进修和访问；首次自行成功研发了拱坝的三分向“拱梁分载法”的动力分析程序，在众多高拱坝工程的抗震设计中被推广应用。

1991年我院被中国科学院批准列入其开放实验室系列中唯一的科学院外的结构振动开放实验室，并在1996年的检查评估中被确认为：“在学术上和解决重大工程实际问题方面达到国际先进和国内一流水平，建议中国科学院和国家有关部门尽快将该实验室列入国家重点实验室建设系列”。可惜其后由于水利和电力两部未能就联合提供开放课题基金达成协议而不了了之，从而错失良机。

在积极学习和参与我国地震部门的有关学术交流中，我院成为取得地震部门颁发的、工程部门

从事场址地震安全性评价的甲级资格证书的极少数单位之一。此外，在此期间本人于 1995 年当选为中国工程院的院士。所有这些都标志了我在工程抗震领域中的研究进展被国内外同行所认可。

综上所述，经历了这个阶段，总体上可认为，我院对水工混凝土结构抗震研究，已经从入门的“启蒙”阶段，逐步进入到了初步与国际接轨的“跟跑”阶段。

2.3 抓住机遇追赶前沿的“并跑”和冲刺阶段 第三阶段是从 1997 年以后至今的又一个 20 年的历程。1997 年我院组建“工程抗震研究中心”，又正逢我国在水能资源集中的西部，高速兴建了一系列 300 m 级超大型高坝，为水工混凝土结构抗震研究提供了更有利的条件，是我院水工混凝土结构抗震研究进展的关键阶段。2008 年在四川发生了汶川大地震，国家和社会对高坝大库的抗震安全更加关注和重视。国家发展改革委员会对重大高坝工程提出了为“防止在极端地震下高坝地震灾变导致的严重次生灾害”进行抗震复核的要求。我们以此国家急需和学科前沿作为研究的重点，涉及到如何确定极端地震的地震动输入和高坝工程地震灾变（溃坝）的定量判别准则的两大关键性难题。

为此，由我们牵头负责，联合了河海大学、西安理工大学，申请了国家自然科学基金委员会重大项目《西部能源利用及其环境保护的若干关键问题》中的重点项目《西部高拱坝抗震安全》的资助。以自主研发的、能体现“近断裂大震”特点的“随机有限断层法”计算软件，重建了汶川地震时沙牌和紫坪铺大坝的输入地震动时程。初步解决了确定工程场址极端的“最大可信地震”的地震动输入难题；并开展了大坝混凝土材料全级配试件动态特性、损伤演化规律及预加静载影响的研究。

随后，我们又争取到中国工程院的重点咨询项目“西部强震区高坝大库抗震安全研究”，开展了基于损伤力学理论和高性能“云计算”技术的坝体和地基岩体损伤破坏过程的研究。用自主研发的非线性并行计算软件，验证了沙牌拱坝在汶川地震中的震情，基本解决了确定混凝土高坝工程地震灾变定量判别准则的难题^[6]。

这些研究使我院混凝土高坝的抗震设计和研究，跨越了两个新的台阶，其成果在 200 m 以上混凝土高坝工程中广泛应用，并在国内外学术刊物发表，还获得了中国水力发电工程学会首次授予的科技进步特等奖，并被纳入由我们主编的我国首部国家标准《水工建筑物抗震设计标准(GB 51247)》。由部分研究成果，撰写成《高拱坝抗震安全》专著^[7]，作为“十二五”国家重点图书出版规划项目出版后，成为中国电力出版社唯一入选国家新闻出版广电总局第四届“三个一百”原创图书出版工程，并荣获中国出版协会第五届中华优秀出版物图书提名奖。此外，又被国际知名的出版科学著作的爱思维尔 Elsevier 出版社在国外以英文出版^[8]。

在此期间，随着改革开放的不断深入，我们积极参加了国际大坝委员会、世界地震工程学会等国际交流活动，从而更有利于扩宽视野，跟踪前沿。本人获得了国际大坝委员会 2011 年度唯一的终身成就奖，这体现了我们团队的科研成果被国际同行的认可。

所有这些标志了我国的水工混凝土结构抗震研究，开始从“跟跑”进入了与国际同行“并跑”的阶段，并为局部能攀上引领的阶梯创造了条件。

3 对 60 年主要科研成果的概括

回顾 60 年在科研征战的历程，沿着所遵循的理念，在团队群体的齐心协力共同努力下，逐步把混凝土坝的抗震科研不断推上了新台阶。以下简要概括了由我们主持、加上有关单位的协作下所取得的、涉及大坝抗震安全的诸多前沿性科研成果。

3.1 场址的地震动输入 针对水工建筑物的特点，与地震部门紧密协作，对场址的地震动输入进行了深化研究。

3.1.1 地震动输入的理解和机制^[9] 对应结构地震响应突破传统的封闭体系到开放体系的波动体系的进展，相应坝址地震动输入机制从坝底振动转为从与坝下一定深度内的近域地基地部入射的波动，澄清了在大坝工程界长期存在的对输入地震动理解的混淆和争议，基本形成了以下共识：（1）作为结构抗震设计中主要设防依据的设计峰值加速度，是其在基岩平坦自由地表的水平向分量表征

的工程场区的地震动输入参数，它既未考虑任何实际场址的地形、场地土类别、工程近域地基的地质构造，更不涉及要建造的结构类型。(2)因地壳介质的密度随地层深度而增大，以剪切波为主的地震动，从震源传播至地表时接近竖直向入射。(3)因自由地表的地震动迭加了与入射波等值的反射波，竖向入射的地震动峰值加速度可取其地表值的 1/2。(4)作为开放波动体系的大坝地震动输入参数类型，需与其响应分析模型中所采用的模拟地震波能量向远域地基逸散的透射式黏滞阻尼等人工边界的类型相适配。

3.1.2 场地相关的地震动输入参数 提供了更合理的场地相关的地震动输入参数，包括：(1)高坝抗震设计中需要采用场地相关设计反应谱和现有的“一致概率反应谱”因其过于保守的包络特性、且我国尚无反应谱衰减规律而难以实际应用。为此，提出了更合理的、基于坝区地震安全性评价、确定发生概率最大的设定地震，再根据中、美地震活动的可比性，按美国最新的“下一代地震动衰减关系(NGA)”中的反应谱衰减关系，求得规一化的场地相关设计反应谱^[10-11]。(2)为适应结构损伤过程非线性分析需要，研究了以更切合实际的幅值和频率都非平稳的渐进功率谱，替代假定频率平稳的传统反应谱^[12-13]，并给出接近我国国情的、由震级和震中距确定目标渐进功率谱的统计回归模型中的各项系数^[14-15]。(3)为反映极端的最大可信地震的近场大震特征的面源发震机制替代传统的点源发震机制，采用半理论、半经验的“随机有限断层法”，将发震断层划分为子断裂点源群，按其破裂模式、时间序列，顺序叠加通过相应传播途径和场地效应，直接生成坝址地震动参数。(4)自主研发了确定上述各项地震动输入参数的整套计算软件。

3.2 大坝混凝土材料的动态试验

3.2.1 动态强度和损伤本构

(1)为突破大坝混凝土仅依赖湿筛试件的陈规，结合不同实际工程，进行了全级配试件在往复变幅加载下的抗压和弯拉强度及其应变率效应的试验研究。(2)建置了引进的适用于大坝混凝土全级配试件的 15MN 的静、动态材料试验装置。(3)成功测定了难度很大、至今尚少见的混凝土拉、压损伤全过程的本构关系，为材料非线性分析提供了基础依据。

3.2.2 已有静载对地震应变率影响及内部开裂过程

(1)针对工程运行后遭受地震时，已有静载对大坝混凝土应变率效应影响的问题，进行了在预加不同静载下的动态强度试验，试验结果表明忽略静载影响稍偏安全。(2)把大坝混凝土作为符合实际配合比的骨料、水泥浆、及其界面的复合材料，对试件进行计入损伤和应变率效应的细观力学动态分析，与预加静载的试验结果相互验证并探讨了其机理。(3)应用“动态声发射”及 X 射线 CT 设施进行试验，研究了混凝土材料内部的开裂过程，并研发了适用于 CT 试验的动态拉、压加载设备。

3.3 结构地震响应的分析 研发了大坝体系地震灾变高效分析的求解途径和定量判别准则^[16-17]。

3.3.1 分析依据的理论和建模的进展

(1)从基于结构力学平面假定的拟静力法，到基于有限元法的动力法。(2)从把坝体作为整体结构的线弹性问题，到基于“动接触理论”计入其纵、横缝开合和滑移的接触非线性问题，再进展到基于损伤力学的、同时考虑坝体和地基岩体的损伤演化的材料非线性问题。(3)针对我国多泥沙河流的水库底部的吸能边界，及其反射系数很难确定的现场测试成果^[18]，论证了可忽略库水可压缩性、把坝面动水压力作为附加质量，使其模拟大为简化。(4)建立了可同时计入坝体分缝等细部结构、邻近坝体地基内各类地质条件及其人工边界、坝面动水压力等复杂因素的更切合工程实际的坝体—地基—库水体系的地震动响应分析模型。

3.3.2 分析思路和求解方法的改进

(1)把地震响应的分析从在频域内，只计地基弹性的封闭体系的振动问题，改进到在时域内，考虑实际存在的地基的质量和地震波能量向远域地基逸散的开放体系的波动问题。(2)研发了根据损伤演化试验成果计入残余变形，求解体系损伤、破坏过程的简捷新方法。(3)从对体系分别作拉、压强度校核和基于刚体极限平衡法的抗滑稳定校核，改进到把强度和稳定耦合一体的综合分析，提出以

位移响应突变作为判别工程地震灾变的定量准则。

3.3.3 高性能分析技术的应用 从沿用基于小型台式计算机进行的串行分析,发展到基于“云计算”技术和自主研发的分析软件对海量自由度精细体系进行高效并行计算。

3.4 室内外的试验验证 为验证大坝地震响应分析计算成果,进行了坝体-地基-库水体系的室内外模型试验验证。

3.4.1 大坝线弹性体系的室内动力模型试验研究

(1)从以激振器测定模态特性,到建置地震模拟电磁振动台以分别测定结构的水平向和竖向的地震响应,再到建置国际先进的三向六自由度大型地震模拟液压振动台,并研究了相应于小变形的相似准则。(2)从应用石膏模型材料,进展到研制满足相应水弹性相似要求的加重橡胶和基本满足混凝土材料拉压强度特性的脆性模型材料。(3)研发了体现坝体横缝和近似模拟地基的关键潜在滑块、渗压和辐射阻尼等效应的试验技术。

3.4.2 大坝现场的原型测振试验研究

(1)从利用地脉动、爆破等手段的现场原型测振,发展到近 20 年的中美长期科研协作中对不同拱坝的现场测振试验。(2)从应用我院研制的 4 台同步起振机,再进展到中美共同开创的可重复使用的下游多孔水封爆破和上游水下浅层岩表爆破技术,生成在岩体传播的能激发坝体-地基-库水体系的地震动。(3)试验验证了拱坝自振特性的分析程序,根据实测结果分析,发现了对库水可压缩性效应十分敏感的库底反射系数是“与频率及时空显著相关、远非通常假定的固定常数”的重要特性。

3.5 编制和修订了我国的水工抗震设计规范 由我院作为主编单位,先后编制和修订了我国的水工抗震设计规范和标准。

(1)1978 年颁布的水利电力部行业标准《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ 10-78)。

①采用的“拟静力法”地震响应分析中,引入并阐明了设计地震动峰值加速度的综合影响系数。②改进了动力分析中的设计反应谱的高频段形态。③基于初步的动力分析确定地震惯性力沿结构高程的分布;并对各类水工建筑物提出抗震工程措施要求。

(2)1997 年完成水电和水利两部门《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5973-1997)和《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203-97)。

①抗震设计的校核分析从“拟静力法”基本转向以动力法为主。②在对可靠度设计理论研究的基础上,使水利和水电部门统一采用由单一安全系数法向以分项系数表达的多安全系数法的转轨。③抗震设计从着重校核计算向校核计算与工程措施并重跨越。

(3)2015 年国家发展改革委员会能源局颁布的《水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047-2015)和 2018 年颁布的国家标准《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247-2018)。

①突出了以“防止高坝在极端地震下发生严重灾变”为重点的国家急需。②对重要工程,规定了在最大可信地震作用下,抗震安全要进行专题论证及其内容的原则要求,为突破现行坝工设计规范只适用于 200 m 坝高的限制创造了条件。③扩充了边坡、渡槽、升船机等抗震的内容。

以上成果表明,我院对水工混凝土结构抗震进行了较为全面和系统的研究,建立了先进的试验设备、自主研发了所有主要分析软件,并始终紧密结合国情和工程应用,追踪学科前沿和与国际接轨。从而先后获得了国内外诸多奖励。1978 年团队被评为全国科学大会先进集体;1986 年以来,获得了 30 余项国家级和省部以上的科学技术进步奖项;2007 年我院和我个人分别被中国地震局、科技部、国防科工委、中国科学院、国家自然科学基金委联合授予全国地震科技工作先进集体和个人称号;1992 年我被建设部评为全国抗震防灾先进工作者,2002 年被选为中国建筑学会抗震防灾分会理事长。我个人分别于 2004 年当选国际大坝委员会地震专业委员会副主席、于 2011 年获得国际大坝委员会终身成就奖。这一切都标志了国内水利水电、地震和抗震界及国际大坝工程界,对本院的水工抗震科研成果的高度认可,彰显了我院在水工抗震领域的国内外影响。

4 创新驱动激发突破陈规的引领愿景

在 60 年的漫长征途中, 我院虽已为我国高坝抗震安全提供了技术支撑, 但面对确保位于强震区的超大型高坝工程在极端地震下不发生严重灾变、突破陈规编制 200 m 以上高坝设计规范等需求, 仍然任重道远, 面临必须应对的严重挑战。

4.1 对混凝土高坝常规设计现状的质疑 高坝的抗震安全必须要在与静载作用效应综合分析后进行评价, 其设计理念和方法不能不受现行常规设计理念和方法的制约。但国内外已有的观测资料表明, 即使在正常运行中, 一些表征坝体状态的重要参数的设计计算值与实际监测值, 存在着按现行设计理念和方法难以解释的明显差异。

4.1.1 我国迄今尚无 200 m 以上高坝的设计规范 当前我国的坝工设计, 其理念和方法仍基于 1930—1950 年代欧美在大坝建设中创建的框架。主要依托中、小工程的实践经验, 受当时技术水平和条件的制约。因而对 200 m 以上高坝工程难以适用。

4.1.2 难符合实际的现行混凝土坝的设计理论、方法和基本假定

(1) 坝体结构分析基于平截面假定的结构力学方法; (2) 坝体混凝土材料在线弹性范围内; (3) 坝体作为整体结构, 忽略纵、横缝及孔口等影响; (4) 近似地以 Vogt 系数计入地基岩体的弹性变形而不计其强度; (5) 对重力坝采用“坝踵无拉应力”准则, 对拱坝坝体限定与混凝土等级无关的 1.2 MPa 和 1.5 MPa 的静、动态允许抗拉强度; (6) 在忽略坝体与地基变形耦合和其它诸多假定下, 以“刚体极限平衡法”以及与坝体强度分开校核的稳定。

国内外一些高混凝土坝的观测资料^[19]都表明, 在坝踵部位都呈现出较大的压应力。有些重力坝的实测结果显示, 坝踵的压应力甚至超过坝趾的。这是基于上述传统设计中的陈规所难以解释的。

4.1.3 有限元法导致的混凝土坝踵应力集中是一个伪命题 基于弹性力学的有限元方法之所以难以替代基于平截面假定的结构力学方法作为主要设计的依据, 主要因其线弹性假定导致无法回避的坝踵“角缘效应”必然产生的随网格尺寸变化的拉应力集中现象。实际上, 坝基的多裂隙岩体在坝踵部位受拉后, 其抗拉强度远低于坝体混凝土及保证施工质量下的坝基接触面的抗拉强度, 将首先导致向岩体深部的开裂, 从而坝踵部位的应力被释放, 因而混凝土坝踵应力集中是一个伪命题。为确定地震灾变的定量判别准则, 势必首先要突破传统的线弹性分析, 进行坝体和邻近岩体损伤破坏过程的非线性分析。

4.1.4 地质力学模型试验不能反映拱坝真实的整体安全性 现行设计规范规定, 对高坝或地质条件复杂的拱坝, 应采用数值计算或地质力学模型试验, 以提高水压力容重的超载倍数, 综合评价拱坝整体安全性。这类试验把坝体强度和拱座稳定融为一体以校核拱坝的整体安全性, 体现了两者不应分隔校核的合理方向。但试验中, 坝体及地基岩体的抗拉强度及损伤本构关系的无法满足相似要求, 实际也不可能发生水压力容重增长的超载。因而试验不能反映真实的拱坝整体安全性。

4.2 抗震设计中对陈规的突破尤为迫切 高坝抗震安全的评价需基于与正常工况的静载作用效应的叠加。因在抗震设计中, 还要进一步突破与抗震有关的不合理陈规。

4.2.1 封闭系统振动方式不能体现坝体-地基-库水开放体系的动态相互作用 按现行规范的高坝设计中, 无论是基于结构力学方法中采用的 Vogt 地基或有限元法中的无质量地基的分析模型, 都仅考虑地基的弹性变形, 并从坝底输入设计地震动加速度。因而只能作为封闭系统的振动问题求解, 无法计入实际存在的地基质量的惯性作用、地震波能量向远域地基逸散的辐射阻尼、以及沿坝基地震动输入的幅值和相位都不均匀分布等因素。

4.2.2 作为整体结构的高拱坝假定下不能求解真实的地震应力状态 作为整体结构的高拱坝在强震作用下, 其拱向地震动拉应力值很高, 根本无法满足规范规定的在地震工况下不超过 1.5 MPa 的要求。实际这样的高拱向拉应力并不存在。因为拱坝中抗拉能力很低的横缝, 在地震的往复作用过程中, 受拉稍大的横缝必然会因其反复开合和滑移而释放坝体的拱向拉应力, 使作为高次超静定结构

的坝体重新调整其应力状态。用现行规范中基于平截面假定的线弹性结构力学方法，很难求解这类非线性接触问题。

4.2.3 “刚体极限平衡法”完全不能反映往复地震作用下的高拱坝整体稳定性 传统的不计坝体坝肩岩体动态变形耦合和坝基岩体的地震动态效应的“刚体极限平衡法”，之所以完全不能反映高坝的实际抗震稳定性，是因为：(1)在往复的地震作用下，瞬间达到极限平衡状态，并不一定导致高坝体系最终失稳。而即使潜在滑动岩块的整体并未达到极限平衡状态，而仅有其滑动面的局部开裂或滑移，但由于坝体和坝基岩体的动态变形耦合，也可能导致坝体严重受损。(2)在地震往复作用过程中，拱坝坝体对拱座潜在滑动岩块间接触力的大小和方向、以及岩块各滑动面的应力和接触状态都在动态变化之中。(3)拱座潜在滑动岩块本身并非刚体，其动态变动中的地震惯性力的大小和方向，并不一定与坝体传递的接触力同时达到最大值或处于最不利方向。

4.3 成为敢于担当引领世界高坝抗震设计规则制定的积极参与者 综上所述，当前传统的设计理念和已难以切合高混凝土坝的实际。在其抗震设计中突破已难切合实际、不能经受监测资料检验陈规的要求尤为迫切。当前，我国已成为世界高坝建设的大国。我国对高坝抗震的科技进展和工程实践，已为现行高坝设计的突破常规创造了基本条件，需要进一步深化研究并尽早形成共识，争取成为引领世界高坝设计跃上新台阶的规则制定者。使我国在世界高坝建设中向由大转强迈进，为世界高坝建设做出更大贡献。为制定 300 m 级高坝设计的规范，以应对高混凝土坝抗震设计面临的挑战，冒昧提出下列建议以供参考：(1)凸显一个重点的要求，即防止极端地震下，高坝地震灾变导致的次生灾害；(2)破解两个关键的难题，即确定反映近场大震特征的地震动输入和制定体现坝体整体地震失稳的定量准则；(3)综合三类学科的交叉，即基于场地相关地震输入、体系地震响应分析和材料动态抗力试验间的相互配套；(4)突破四个层面的传统，即在求解概念上，由封闭系统的振动问题转向开放系统的波动问题；在校核思路，把分别对静、动载作用下的强度和稳定的分开校核转向静、动载作用下的强度和稳定于一体的整体校核；在分析方法上，从基于平截面假定的线弹性结构力学法转向计入接触和材料非线性的有限单元法；在计算技术上，由常规的串行计算转向高性能并行计算。

相信正向世界一流科研机构迈进的我院，已成功争取到“十三五”国家重点研发计划项目《300 m 级特高坝抗震安全评价与控制关键技术》的立项，势将持续领导我院工程抗震研究中心，在创新驱动的激励下，成为敢于担当引领世界高坝抗震设计规则制定的积极参与者。

参 考 文 献：

- [1] 陈厚群. 混凝土高坝抗震研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] CHEN H Q. Seismic safety of high concrete dams [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(S1): 1-16.
- [3] CHEN H Q. Progresses in Seismic Aspects of Dams in China[C]//Proceedings of 100th Anniversary Earthquake Conference, Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake. San Francisco, California, U.S.A., 2006.
- [4] CLOUGH R W, CHANG K T, CHEN H Q, et al. Dynamic interaction effects in arch dams[R]. University of California, Berkeley, California, U.S.A., 1985.
- [5] National Research Council U.S. Earthquake engineering for concrete dams: design, performance and research needs[M]. National Academy, 1990.
- [6] CHEN H Q, LI D Y, GUO S S. Damage-rupture process of concrete dams under strong earthquakes[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2014, 14(7): 1450021.
- [7] 陈厚群, 吴胜兴, 党发宁. 高拱坝抗震安全[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [8] CHEN H Q, WU S X, DANG F N. Seismic Safety of High Arch Dams[M]. Elsevier Academic Press, 2016.
- [9] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1417-1423.
- [10] ZHANG C R, CHEN H Q, LI M. Earthquake acceleration simulation with statistical law of evolutionary power

- spectrum[J]. *Eathquake Science*, 2007, 20(4): 435–446.
- [11] ABRAHAMSON N A, SILVA W J . Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground motion relations[J] . *Earthquake Spectra*, 2012, 24(1): 67–97 .
- [12] PRIESTLEY M B . Evolutionary spectra and non-stationary processes[J] . *Journal of the Royal Statistical Society*, 1965, 27(2): 204–237 .
- [13] PRIESTLEY M B . Power spectral analysis of non-stationary random processes[J] . *Journal of Sound and vibration*, 1967, 6(1): 86–97 .
- [14] NAKAYAMA T, FUJIWARA H, KOMATSU S, et al . Nonstationary response and reliability of linear system under seismic loadings[M] . Schueller, Shinozuka & Yao . *Structural Safety & Reliability* . Balkema, Rotterdam, 1994 .
- [15] KAMEDA H, SUGITO M, ASAMARA T . Simulated Earthquake Motions Scaled for Magnitude, Distance and Local Soil Conditions [C]//*Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering* . 1980 .
- [16] 中国工程院土木、水利与建筑工程学部, 中国水利水电科学研究院 . 西部强震区高坝大库抗震安全研究项目总报告[R] . 2014 .
- [17] 陈厚群, 李德玉, 郭胜山, 等 . 2008 年汶川地震中沙牌拱坝的震情检验和分析[J] . *水利水电技术*, 2015, 46(6): 1–9 .
- [18] GHANAAT Y, CHEN H Q, et al . Measurement and prediction of dam-water-foundation interaction at Longyangxia dam[R] . Orinda, California, U. S. A. , 1999 .
- [19] 王志远 . 重力坝的实测坝踵应力及原因分析[J] . *水电与抽水蓄能*, 2000, 24(6): 14–17 .

Research on concrete hydraulic structures in the past 6 decades

CHEN Houqun

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*)

Abstract: In this paper a brief introduction to major progress in the research on seismic aspects of concrete hydraulic structures, mainly high dams, conducted at the China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) during the past 60 years, is presented. Its three development stages of starting, running after and catching up with the world frontiers are reviewed. Some major research achievements are described, such as: seismic input at dam site and defining its site specific seismic parameters, non-linear dynamic parallel analyses of seismic responses and damage-rupture process of dam-foundation-reservoir system by using high-performance ‘cloud computing’, quantitatively evaluating the criterion of the limit state of dam-breach, dynamic model tests on triaxial earthquake simulator with six degrees of freedom, field experimental investigation of dams and seismic monitoring at dam site, study on dynamic behaviors of dam concrete including its damage institution laws by fully-graded specimen tests and investigating its internal cracking pattern using 3-D meso-mechanics analysis and X-ray CT technology, formulating state seismic design standard for hydraulic structures, etc. Finally, some comments on updating the conventional seismic design idea and methodology are suggested.

Keywords: concrete hydraulic structures; dynamic dam behaviors of concrete; seismic input at dam site; seismic responses; seismic design code; updating conventional design

(责任编辑: 杨虹)