

# 混凝土高坝抗震研究六十年

## 绪言

本书主要为反映中国水利水电科学研究院六十年来在高混凝土坝抗震设计和研究方面的进展。特别是近十余年来,随着中国在西部强地震区一系列少有先例的 300m 级高坝的兴建,在高坝抗震安全研究方面取得的一些紧密结合中国国情和工程实践、追踪学科发展前沿、对传统有所突破的基础性的创新研究成果及其工程应用,以期促进在此领域的国际学术和工程界的交流,有利于进一步发展共同协作。同时,也有望能给从事高坝抗震或与之有关的设计科研的专业人员、高校师生以参考。

全书着重于简明扼要、但较全面系统地介绍在高混凝土坝抗震安全设计和研究方面有中国特色的自主创新成果及其在中国高坝工程实践中的应用。以期对其有一个总体概念和系统了解。因此,对于一般性的概念叙述和详细的方法推导均予以从略。读者如有需要,可参阅所附参考文献和作者发表的有关论文和报告。

书中内容主要取材于在行业中具有一定代表性的中国水利水电科学研究院有关高混凝土坝抗震的研究成果。着重全面系统地反映了作者本人在从事高坝抗震科研五十余年中,在为高坝工程服务的实践中逐步累积形成的有关高坝抗震安全的理念、思路、探索和体会。所引用的主要是作者亲自参与的研究、带领团队和研究生共同完成的任务及主要负责的课题中的代表性成果,均注明了所依据的文献资料。

作者对在与本书内容有关的工作中,共同努力的协作者们多年来的支持、帮助和相互切磋表示衷心感谢;对朱伯芳院士在百忙中为本书所作的校阅、提出的宝贵意见、所写的序言和给予的鼓励表示深切谢意;对国际大坝委员会贾金生主席及中国大坝协会的支持深表谢意。

限于作者的水平和能力,不妥和疏漏之处自在所难免,也恳切期盼得到国内外有关同行、学者们的不吝指正和赐教。

## 1 中国国情和大坝抗震

中国的水利建设虽有悠久历史,但近代的大坝建设基本是始于 1949 年,初期的大坝抗震设计都沿用美国和前苏联的拟静力方法,主要是在 1959 年广东新丰江大坝蓄水后频发地震,需要进行抗震加固,才开始了包括动态分析、动力模型试验、现场原型测振和强震观测等较全面系统的大坝抗震研究,六十年来随着中国水利水电建设的发展,陆续兴建了一批重要大坝工程,有力地推动了大坝的抗震设计和研究。

作为大坝抗震的社会和工程背景,有关的基本国情可概述如下;

如所周知,水和能源是人类社会发展的重要物质基础,直接关系到社会和国民经济的可持续发展、人民物质和精神生活的提高与改善,同时也是影响中国经社会发展的重要制约因素。在实现现代化和全面小康的宏伟目标过程中,中国正面临着人口、资源和环境的巨大挑战。

21 世纪水已经成为全球关注的焦点,困扰人类社会的水问题在一些区域激化成了水的危机。作为基础自然资源和战略性经济资源的水资源是国家综合国力的组成部分。中国人均水资源极为短缺,仅为世界人均占有量的 1/4,据世界银行统计,在世界 153 个国家中排行

第 88 位。根据预测到 2030 年中国人口增至 16 亿时，人均水资源量仅  $1760\text{m}^3$  少于国际公认的用水紧张国家的标准，而且受季风气候条件影响，径流量在时间分布上很不均匀，年内汛期洪水径流量约占  $2/3$ ，年际变化剧烈，洪旱灾害频发，严重制约社会经济发展，影响生态环境。中国水资源在空间分布上也极不均衡，从东南向西北递减，且与土地资源不相匹配。因此，中国在经济快速发展、全面建设小康社会的进程之中，面临着水资源短缺、水灾害严重、水环境恶化与水土流失加剧的威胁。应对水危机的挑战，成为全面建设小康社会，保障人民健康，保障粮食安全，保障生态安全，保障人民生命财产安全，支撑中国经济社会可持续发展的重大的战略问题。这是基本国情之一。

所以，加强水库大坝的建设以尽可能调节利用汛期洪水，是水资源的合理配置利用、抗旱防洪减灾、大江大河治理、水环境保护与水生态修复等的战略需求。

能源是经济和社会展最重要的战略资源之一，而能源安全为各国所普遍关注，并对中国实现全面建设小康社会和迈向基本实现现代化的中长期战略目标有决定性作用，尤其是作为国民经济的先行和基础产业的电力二次能源更为重要。但是中国经济规模总量大，而能源资源相对贫乏，人均拥有量只相当于世界平均水平一半；特别是以煤电占近 76% 的二次能源结构，已日益受到环境和水资源容量的制约而难以持续。虽然在中长期以内煤电为主的能源结构尚难根本改变，但降低其占有量已刻不容缓。在中国发展风电、太阳能和生物质能等可再生能源和核能，有广阔前景，但由于其质量特性、经济、技术、资源方面的原因，据有关方面预测，至少在 2030 年前在电源装机中，风电、太阳能、生物质、核能所占比重不可能很大。中国的水能资源位居世界之首，仅中国大陆部分水电的技术可开发容量为 5.4 亿 kW (潘家铮, 2007)，按使用 100 年计算，水能资源约占已探明的常规能源的 40%。在中长期内，包括抽水蓄能在内的水电能源占到 22.3%，将仍是应对气候变化、减少煤电排放、改善二次能源结构的主力军。这是基本国情之二。

大力发展可再生水电清洁能源，是集国土整治、河流开发、防洪抗旱、应对气候变化、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工程。高坝大库因其具有调节性能好、装机容量大、综合效益高等特点，在水电工程建设中，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知正不断深化。在充分重视移民安置、生态和环境影响的前提下，积极有序的进行水库大坝建设，更是切合中国国情，并为社会经济发展所急需，已成为中国当前基础设施建设中不可或缺的重要组成部分。作为基础自然资源和战略性经济资源的水资源是国家综合国力的组成部分。

中国大陆处于地壳几大板块的夹持之中，位于世界上两个最活跃的地震带交汇部位，东濒环太平洋地震带西支，西部和西南部是欧亚地震带所经之处，是一个多地震国家。中国大陆属欧亚板块东部，地震具有发生在大陆内部的板内特点。板内地震由于地壳较厚、岩龄较老、强度较高，积聚的能量大而导致地震的强度大，且震源大多在 10-30km 深度内，内陆浅源地震的震害破坏都较重。因此，中国不仅地震区域广阔而分散，地震也频繁而又强烈。仅 20 世纪内，震级等于或大于 8 级的就达 10 次之多。据中国地震局资料，中国大陆每个省均发生过 5 级以上地震。其中除浙江和贵州省外的 29 个省都发生过 6 级以上地震，20 个省发生达 7 级以上地震。图 1-1 为中国地震动峰值加速度区划图。从中可见，大部分国土面积都属地震区。中国大陆有两条明显的地震带，一条从北向南穿越国土中部，另一条自东向西跨过华北地台。据中国地震局资料，中国大陆每个省均发生过 5 级以上地震。其中除浙江和贵州省外的 29 个省都发生过 6 级以上地震，20 个省发生达 7 级以上地震。地震灾害严重威胁着人民生命财产安全，同时也是制约经济建设和社会发展的重要因素之一。中国是世界上蒙受地震灾害最为严重的国家。人类历史记载上，造成 20 万人以上死亡的大地震有 6 次，中国占 4 次。就 20 世纪以来，1920 年宁夏的海原地震，死亡 20 余万人，伤者不计其数。

1976年唐山地震，死亡达24万余人，损失极为惨重。中国地震局统计，20世纪以来，全球因地震死亡的总人数近150万，中国有近60万，约占40%。自1949-2000年，在中国各种自然灾害造成人员死亡约55万人中，因地震灾害死亡的超过一半，达28万人(胡聿贤,2006)。进入21世纪后，2008年在中国四川省东部汶川附近发生的8.0级强烈地震，震中最大烈度达11度。震区遭受灾难性的严重破坏，受灾面广，因灾遇难人数超过7万，是中国六十年以来破坏性最强、波及范围最广的一次地震。四川省是中国水资源大省、水能资源位居全国之首，因此水坝和水电站众多，在这次地震中遭到了不同程度的损害。所以，震情严峻、震害严重是基本国情之三。