

Aseismic Design of Arch Dam : Theory & Practice

拱坝抗震设计理论与 与实践

王海波
李德玉

编著

Aseismic & Arch Dam :

Design of
Theory & Practice

拱坝抗震设计理论 与实践

王海波
李德玉 编著



内 容 提 要

中国水电开发建设进入了一个前所未有的高速发展时期。在水能蕴藏量占全国 80% 以上而地震频发的西部地区,多座 300m 级高拱坝正在或即将兴建,抗震安全问题十分突出。本书作为拱坝抗震设计的专著,从拱坝的设计基础理论、设计原则、数值分析方法、动力模型试验方法和抗震安全评价等方面进行较全面的介绍。本书特别结合作者近年在 300m 级高拱坝抗震研究的成果,介绍拱坝抗震设计的最新发展。

本书既可供从事拱坝设计、研究的专业工程技术人员使用,也可作为高等院校研究生相关专业课程的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

拱坝抗震设计理论与实践 / 王海波, 李德玉编著.

北京: 中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-1900-6

I. 拱... II. ①王... ②李... III. 拱坝—抗震设计
IV. TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 149470 号

书 名	拱坝抗震设计理论与实践
作 者	王海波 李德玉 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 6.875 印张 185 千字 1 插页
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	20.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



王海波 1961年出生，工学博士，教授级高级工程师，中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心总工程师，中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会副秘书长。1986年于大连工学院获工程硕士学位，同年就职于水利水电科学研究院抗震防护研究所；1994年于日本冈山大学获工学博士学位；1995年于日本技术开发株式会社地震防灾部任主任职员；1996年于日本铁道综合技术研究所任主任研究员，主要从事工程结构抗震研究和设计规范的编制工作；1999年回国后，主要完成的研究包括水工结构抗震动力分析、动力模型试验，核电站设备抗震等多项国家重点工程及国家自然科学基金重点科研项目的科研工作。曾获部级科技进步二等奖2项，发表学术论文50余篇。



李德玉 1962年出生，教授级高级工程师，中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心副主任，中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会委员。1983年毕业于清华大学水利工程系水利水电工程建筑专业；1986年毕业于水利水电科学研究院研究生部，获水工结构工程硕士学位；1986-1996年在水利水电科学研究院抗震防护研究所工作；1996-1998年在日本东北电力株式会社参加电力土木方面的科研与设计工作；1998年至今在中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心工作。长期从事各类水工结构的抗震科研工作。结合国家重点水电工程，负责或参与完成多项国家科技攻关重点项目、国电公司重点科技项目、国家自然科学基金项目等抗震科研工作。发表学术论文30余篇。曾获国家科技进步奖3项，部级科技进步奖5项。

我国的水能资源居世界之首，约 80% 分布在西部，主要是西南地区。这些地区河谷陡峻，地形地质条件适宜于修建淹没少、调节性能好的高坝大库，尤其是高拱坝。近年来，已建、在建和近期拟建的大型水电工程，大多都采用 200~300m 级的高拱坝方案。例如，正在兴建中高 292m 的小湾拱坝，建成后将成为当今世界最高拱坝；拟建的锦屏一级为 305m 的高拱坝。我国也是一个多地震国家，高地震烈度区也正大多集中在西部地区。因此，很多高拱坝都位于设计峰值加速度达 0.2~0.3g 的强震区，其中如大渡河上的大岗山拱坝，坝高 210m，设计地震峰值加速度高达 0.557g。在很多高拱坝工程的设计中，地震作用常成为控制工况。高拱坝的地震安全性评价为工程界和社会公众所深切关注。

拱坝工程抗震问题十分复杂，特别对于位于强震区的 300m 级高拱坝，其抗震安全性评价，突显出一些不同于常规拱坝设计的特点和困难。例如，坝体伸缩横缝开合、坝基高应力集中、坝体与拱座岩块间的变形耦合和抗震稳定性等问题，都呈现显著的实质性变化。对此，目前国内外都尚缺乏先例，需要进行大量的研究工作。

本书作者所在的中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心，长期从事水工结构抗震研究，

参与了我国各个高拱坝的抗震安全性评价工作。自上个世纪 80 年代就建立了我国第一个适宜于高坝抗震研究的三向六自由度地震模拟振动台，性能达到国际先进，探索了相应的大坝动力模型试验材料和方法。在拱坝地震响应分析方面，研发了从动力拱梁分载法到非线性有限元动力分析方法和相应的计算程序。本书作者结合多年来亲身参与的实际工程抗震研究的丰富实践经验和探索积累，着重在高拱坝地震反应分析从基础理论到实际分析方法中的许多实际问题，以及拱坝动力模型试验中的诸多难点，诸如，在满足抗拉强度相似要求的坝体模型材料、坝基岩体辐射阻尼及坝肩潜在滑块滑移面渗透压力的模拟等问题，在思路和方法上都有所突破。全书内容的特点是紧密结合工程实际，深入浅出，突出为工程服务解决实际问题的工程观点。因此可以为从事高拱坝建设的工程设计人员及高校有关专业的师生提供重要的参考。

近年来，国内外在高拱坝抗震安全性评价方面取得了很大进展，但由于问题自身的复杂性，特别是目前尚缺乏高拱坝经受强震考验的实例，高拱坝抗震安全性评价仍面临一系列严重挑战性难题，有待共同继续深化研究。同行们的不断总结，相互切磋，必将有利于推动和促进高拱坝抗震安全性评价工作的更快发展，以满足我国当前在强震区建设高拱坝工程的急需。

中国工程院院士

陈厚群

2005 年 11 月于北京

前言

地震这个大自然演化过程的地质现象，当其发生地点与人类生活生产活动区域足够接近时，将给人类造成严重的破坏。因此，地震被视为最严重的自然灾害之一。随着科学技术的进步和对地震活动的长期观测，人类对地震的发生地点、地震规模以及发生时间有了初步的认知。地震的动力主要来自海底扩张而引起的大陆板块漂移和板块间的挤压，破坏性地震的发生地点与板块边界或活动断层的位置密切相关，地震规模与板块边界运动或活动断层的规模紧密相连。一方面，对于地震发生时间的预测精度目前仍难以满足工程设计的需要；另一方面，自然地质地貌形成的规律使人类在水力资源开发时难以避开发生地震的活断层。天然河道是水流长期冲刷的结果，那么软弱破碎的地表断层带与河道重合交错亦不难理解。因此，工程抗震始终是水电工程建设的一个重要课题。

与发达国家相比，我国的水能资源开发程度还很低。随着经济的发展，特别是进入 21 世纪以来，我国的水电建设进入了前所未有的高速开发阶段。在水能蕴藏量占全国 70% 以上而地震频发的大西南地区，多座 300m 级高拱坝正在或将要投入建设。因此确保拱坝在高地震地区的安全成为

摆在科技与工程人员面前重要而又紧迫的课题。

近些年，伴随拱坝建设的需要，我们对拱坝抗震问题进行了一些研究与探索，包括小湾、溪洛渡和锦屏等一系列跨世纪的高拱坝工程的抗震问题。作者希望通过本书，把我们的经验进行归纳，与工程设计人员及进行拱坝抗震研究的学者专家共同切磋。

本书的第1章概括叙述了拱坝抗震设计的发展趋势、实际震害及中国拱坝建设的现状；第2章简要介绍了拱坝抗震设计所需要的基础理论知识，包括结构动力分析和设计地震动等方面的内容，同时还对工程结构的安全评价标准进行了讨论；第3章涉及拱坝抗震设计原则，即如何评价结构在地震作用下的安全性，同时对拱坝抗震设计的特点加以归纳，并对目前的设计规范进行讨论；第4章综合介绍了拱坝抗震设计的数值分析方法，并通过实际算例进行具体说明；第5章介绍了通过模型试验进行拱坝抗震设计的方法及试验实例；第6章是对今后拱坝抗震设计发展的展望。

承蒙陈厚群院士在百忙之中拨冗作序，中国水利水电出版社阳淼女士认真负责编辑文稿并提出宝贵修改建议。书中许多研究成果是在陈厚群院士领军的中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心诸位同仁的共同协作下完成，作者在此谨表诚挚谢意。

由于水平所限，书中难免存在不足和不当之处，欢迎读者和同行专家批评指正。

作 者

2005年11月于北京

符 号 说 明

$[A]$	拱系数矩阵	K_j	广义刚度
$[C]$	梁系数矩阵	M	地震震级、质量
$[D]$	动力矩阵	M_j	广义质量
$[F]$	柔度矩阵	M_L	里氏震级
$[I]$	单位矩阵	M_s	面波震级
$[K]$	刚度矩阵	N	法向节点接触力
$\{R\}$	外荷载向量	p	水体动水压力
$\{Y\}$	特征向量	q	接触应力
a	加速度	q_j	广义坐标
A_g	众值加速度	R	抗力
c	阻尼系数、黏聚力	S	作用效应
C	水中音速	S_A	加速度响应谱
c_t	切向阻尼系数	S_D	位移响应谱
E	能量、弹性模量	S_V	速度响应谱
F	力	t	时间
F_d	阻尼力	T	周期
F_e	弹性恢复力	T_g	反应谱特征周期
F_i	质点惯性力	t_{gr}	相位斜率
f	摩擦系数、频率	u	位移
f_m	信号截止频率	$\dot{u}$	速度
$f\sigma$	抗剪强度	$\ddot{u}$	加速度
f_s	信号采样频率	u_f	自由波场
G	功能函数	$\ddot{u}_g$	地面加速度
g	重力加速度	u_s	散射波场
K	弹簧刚度	x	位移

$\dot{x}$	速度	γ_d	结构系数
$\ddot{x}$	加速度	γ_j	振型参与系数
$\ddot{x}_g$	地面加速度	γ_m	材料性能分项系数
$\{\Phi\}$	振型向量	η_a	液体剪切黏性
α	P波波速	λ	拉梅系数、特征值
β	S波波速、动力放大系数	μ	拉梅系数
Δ	震中距、位移	ν	泊松比
δ	广义位移	ρ	材料密度
$\dot{\delta}$	广义速度	ρ_{ij}	振型相关系数
$\ddot{\delta}$	广义加速度	τ	切向节点接触力
ϕ	相位	ω	圆频率
γ_0	结构重要性系数	ω_d	有阻尼固有频率
		ξ	阻尼比

目 录

序

前言

第 1 章 概论 1

1.1 拱坝抗震设计的内容与发展 /1

1.2 拱坝实际地震响应 /4

1.3 中国拱坝建设 /10

参考文献 /13

第 2 章 拱坝抗震设计理论基础 14

2.1 抗震设计地震动 /14

2.2 结构动力学基础理论 /34

2.3 基于可靠度理论的结构抗震设计方法 /45

参考文献 /48

第 3 章 拱坝抗震设计原则 50

3.1 抗震设计的基本理念 /50

3.2 拱坝抗震设计规范 /53

参考文献 /65

第 4 章	拱坝抗震动力分析及工程应用	67
4.1	概述 /67	
4.2	拱坝地震动力分析的拱梁分载法 /68	
4.3	拱坝地震动力分析的有限单元法 /75	
4.4	拱坝地震动力反应分析工程实例 /94	
	参考文献 /123	
第 5 章	拱坝抗震设计模型试验	125
5.1	动力模型试验基础 /125	
5.2	动力模型试验设备 /132	
5.3	动力模型的测量与试验数据分析 /135	
5.4	动力模型试验实例 /149	
	参考文献 /206	
第 6 章	拱坝抗震设计展望	208

第 1 章 概 论

1.1 拱坝抗震设计的内容与发展

大坝的安全运行不仅仅是工程技术人员和业主所关心的问题，也是社会广泛关注的问题。从原则上讲，对拱坝的安全要求与其他各类坝型没有差别，只是从技术角度，拱坝有自身的结构特点，因而分析评价手段与其他坝型有所不同。在地震作用下确保拱坝的安全性是拱坝抗震设计的最终目的。如何达到这一目的，就是拱坝抗震设计所要研究的课题。

依据现代工程抗震的最新发展，工程结构的抗震设计主要包括以下三方面内容：

- (1) 设计地震动的确定。
- (2) 结构地震响应分析。
- (3) 结构抗震安全评价。

拱坝是通过拱的作用将静力荷载传递到两岸山体，因此，长期以来拱坝设计从坝体强度和坝肩稳定两个方面分别评价其安全性。拱坝抗震设计也是按照强度和稳定两方面进行的。拱坝抗震分析方法与静力分析方法紧密相连。由于拱坝结构型式复杂，早期拱坝的设计分析多采用纯拱法或拱冠梁法分析结构的强度，更多的通过结构模型试验验证结构强度和坝肩稳定。1923 年美国垦务局开始研究和运用试载法，采用计算机技术后可一次求解，故试载法也称为拱梁分载法，这种方法计算比较简便，又基本反映拱坝的受力特点，并且通过长期实践积累了一定的经验，到目前仍是拱坝设计的主要方法之一。20 世纪 80 年代之后，随着计算

机技术的发展和有限元方法的出现和不断成熟,有限元在拱坝设计中的应用也逐步得到普及。80年代之前建成的拱坝基本上是按拟静力方法考虑地震作用,进行抗震设计。

伴随着拱坝坝高的不断增加,拱坝坝址条件要求的逐渐放宽,以及对地震动和拱坝地震响应认识的不断深入,动力分析方法逐渐成为拱坝抗震设计的主要方法。目前可以对较复杂地质条件、复杂形状的拱坝进行三维拱坝-水库-基础系统的地震响应分析。分析计算中计入了河谷地形条件引起的地震动空间不均匀分布,拱坝构造横缝在强地震作用下的开闭、相对滑移,振动能量向无限基础辐射等影响拱坝地震相应的主要因素,在坝体材料线弹性范围可以得到精度较高的结果。对应的拱坝设计地震动也是通过地震危险性分析按年超越概率给出。拱坝坝体的强度安全则是采用材料容许应力判断,坝肩稳定主要根据潜在滑裂体的抗滑稳定指标判断。

随着强地震动观测记录的不断积累和丰富,以及高地震烈度地区拱坝建设的展开,拱坝设计的输入地震动水平呈逐步提高趋势。更合理地评价拱坝抗震安全成为了一个广为关注的课题。鉴于地震荷载自身的极大不确定性,抗震设计采用多级设防标准已成为工程抗震设计的一个发展方向。在大坝的抗震设计上也有许多国家逐步采用两级地震设防标准。

在1970年以前,美国垦务局大坝设计地震加速度采用 $0.1g$,1974年以后提出设计基准地震 DBE (Design Base Earthquake) 与最大可信地震 MCE (Maximum Credible Earthquake) 两级设防的概念。美国大坝委员会1985年起草并经国际大坝委员会1989年公布的《大坝地震动参数选择导则》(Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects),明确了使用安全运行地震 OBE (Operating Basis Earthquake) 与最大设计地震 MDE (Maximum Design Earthquake) 两级设防的地震动参数选择原则。按照这一准则,在遭遇安全运行地震 OBE 时,大坝应能保持运行功能,所受震害易于修复。一般可采用

弹性分析和容许应力校核。在遭遇最大设计地震 MDE 时, 要求大坝至少能保持蓄水能力。这表示可容许大坝出现裂缝, 但不影响坝的整体稳定, 不发生溃坝。同时, 大坝的泄洪设备可以正常工作, 震后能放空水库。OBE 取 100 年内超越概率 50% (重现期 145 年) 的地震动水平, 关于 MDE 的概率水准或重现期, 没有作明确规定。一般情况下 MDE 取决大坝失事所产生损失大小, 只对特别重要的大坝抗震设计才取 MDE 等于 MCE。

加拿大大坝安全委员会 1995 年制定了《大坝安全导则》(Dam Safety Guidelines), 2005 年 2 月加拿大大坝委员会 (Canadian Dam Association) 提出了 2006 版的草稿。其中提议大坝设计用最大设计地震动水平 EDGM (Earthquake Design Ground Motion) 按大坝事故的潜在次生灾害程度确定, 而 EDGM 是按年超越概率 AEP (Annual Exceedance Probability) 定义的, 见表 1.1。

表 1.1 加拿大大坝最大设计地震动水平的年超越概率

级 别	潜在次生灾害		最大设计地震动水平的 年超越概率
	人员伤亡	经济、环境损失	
很高	大量伤亡	严重损失	1/10000
高	若干伤亡	重大损失	1/1000 ~ 1/10000
小	无预期伤亡	轻度损失	1/100 ~ 1/1000
非常小	无伤亡	除业主财产外无	

欧洲许多国家大都参照国际大坝委员会制定的准则进行考虑。例如, 法国接近 1000 年内发生的最大区域地震在最不利位置处发生时确定 MCE, 按大坝运行期内可能发生一次的地震规模确定 DBE。意大利基本上以国际大坝委员会的准则为基础。南斯拉夫大坝 MDE 的重现期选为 1000~10000 年, 按失事后果确定。瑞士重要大坝的安全评价按 MCE 考虑, 小坝参照房屋建筑的要求考虑。瑞士电力工程服务公司为伊朗若干拱坝 (坝高 100m 左右) 进行的抗震设计, MCE 的平均重现期定为 2000 年左右。其地震加速度值约为 DBE 的 2 倍。MCE 作用时容许大坝开裂, 要求检验被裂缝分割的坝体的动态稳定。假设强震时拱

坝的结构缝、水平施工缝以及坝基接触面上裂缝均张开,按各坝块为刚体的假设分析开裂后坝的稳定性,要求各坝块的相对变形和转动不使坝丧失稳定,不发生坝块坠落。按照他们的经验,设计良好的拱坝,坝的剖面基本上由 DBE 工况确定。

新西兰大坝委员会 2000 年颁布的《大坝安全导则》中也采用 OBE 和 MDE 两级抗震设防标准。一般情况下 OBE 的年超越概率为 $1/150$ 。对于重要的坝 MDE 采用 MCE 或者年超越概率为 $1/10000$ 的地震动,其他坝可采用小于 MCE 或者年超越概率为 $1/10000$ 的地震动。在 OBE 作用下大坝无损伤或仅有轻微损伤。在 MDE 及之后余震作用下大坝允许发生损伤,但不能溃坝。同时还需校核大坝的震后静态安全性,余震下的安全性(一般取较主震低一级的地震),因为主震和余震的间隔时间很难采取任何工程措施。

尽管多级抗震设防水准是一种发展趋势,但是如何分析在 MDE 作用下拱坝的地震响应,如何检验大坝的安全仍有许多问题没有得到解决。首先,必须能够进行拱坝系统的动力非线性响应分析,这显然要涉及大坝混凝土的动态强度问题,包括材料特性对应变速率的依存性,这方面的研究成果相当少。因为进行全级配大坝混凝土的动力试验需要大型材料试验机,目前国内几乎没有。其次,拱坝在强地震作用下开裂后的损伤发展及地震失效模式均无实际震害经验可以借鉴,数值模型的分析结果很难得到验证。特别是,分析模型中是否全面反映拱坝系统地震过程和之后的各种复杂条件,仍难以回答。尽管上面提到的许多大坝安全导则中强调需要验证开裂后的大坝的稳定性,但目前尚缺乏简便可靠的分析方法。

1.2 拱坝实际地震响应

截至 2001 年,世界百米以上的拱坝共有近 200 座,但经历较强地震的为数极少,而设置了强震仪器记录到地震响应的就更屈指可数。下面介绍几个实例。

位于日本爱知县北设乐郡丰根村的新丰根（Shintoyone）拱坝高 116.5m，1973 年建成，如图 1.1 所示。1997 年 3 月 16 日经历了一次 5.8 级地震，震中距坝址约 35km。坝顶记录到最大加速度 1000.2Gal。新丰根拱坝坝顶高程 476.5m，正常蓄水位 474.0m，地震时水位 450.0m。在拱坝上的 7 个不同位置共布设了 17 通道加速度计，加速度最大值见表 1.2。事后对地震记录分析发现，有一些通道混有 80~100Hz 的高频成分，可能是顶部闸门所引起，故对原记录进行了滤波处理，除去 30Hz 以上的成分，处理后的最大加速度值也列于表 1.2。震后坝体未见明显损伤，坝体上的构造横缝也无显著张开迹象。

表 1.2 新丰根拱坝地震最大加速度记录

位 置	方 向	最大加速度 (Gal)	
		原记录	滤波处理 (0~30Hz)
坝顶拱冠梁	径向	1000.2	709.2
	切向	790.2	186.0
	竖向	548.4	175.1
坝顶左岸 1/4	径向	513.8	476.4
	竖向	110.6	104.4
坝顶右岸 1/4	径向	564.4	550.4
	竖向	85.8	88.3
拱冠梁中部	径向	205.4	125.0
坝底廊道	径向	70.1	68.5
	切向	46.2	39.5
	竖向	46.8	45.1
左坝肩	径向	44.1	44.9
	切向	56.1	57.2
	竖向	53.4	51.4
右坝肩	径向	68.1	66.9
	切向	44.9	45.0
	竖向	69.9	69.7