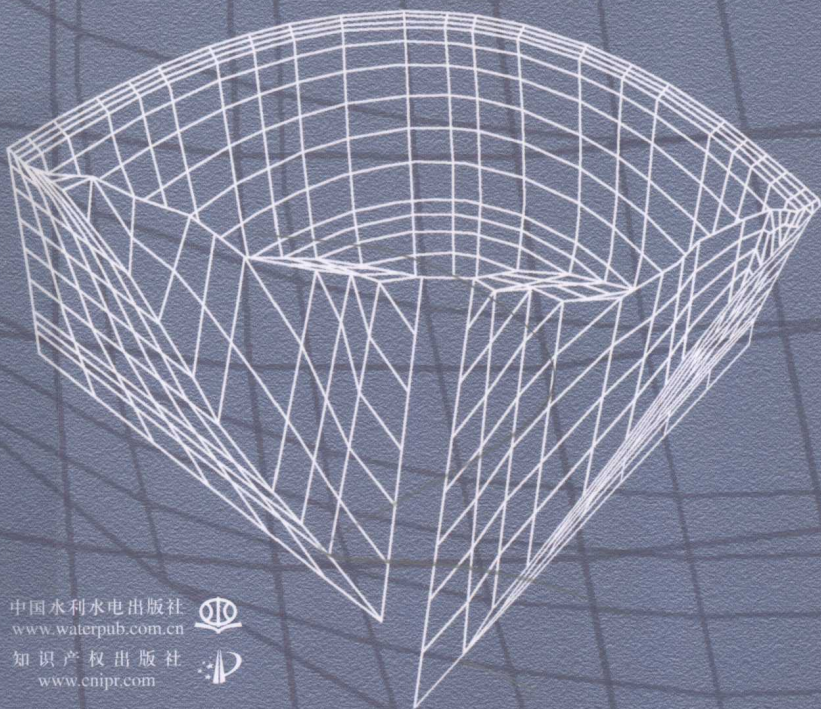


涂劲 编著

混凝土大坝 抗震数值分析理论 与工程应用

Aseismic Analysis of Concrete Dam with
Numerical Method:
Theory & Engineering Practice



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

知识产权出版社
www.cnipr.com



TV64/2

2007

涂劲 编著

混凝土大坝 抗震数值分析理论 与工程应用

Aseismic Analysis of Concrete Dam with
Numerical Method:
Theory & Engineering Practice

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

我国水电建设事业正处在加速发展的时期,而在西南、西北高地震区在建和拟建的大型水电工程面临的抗震安全问题又十分突出,因此混凝土大坝抗震安全性分析与评价为工程界所深切关注。本书介绍了混凝土大坝抗震数值分析的发展状况、基本理论和常规方法;并结合作者近年来的科研工作,重点阐述了混凝土大坝-地基系统的非线性地震波动反应分析方法,以及坝体强度与抗震稳定性校核相统一的新的大坝-地基体系抗震安全评价的概念与方法;同时,结合工程实例,介绍了其实际应用与计算分析成果。

本书既可供从事混凝土坝设计、研究的专业工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生的参考用书。

选题策划:阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip. sina. com; z_baolin@263. net

责任编辑:阳 森 张宝林

文字编辑:彭天教

图书在版编目(CIP)数据

混凝土大坝抗震数值分析理论与工程应用 / 涂劲编著.

北京:中国水利水电出版社:知识产权出版社,2007

ISBN 978-7-5084-5148-0

I. 混… II. 涂… III. 大坝:混凝土坝—抗震—数值—分析 IV. TV64

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182802号

混凝土大坝抗震数值分析理论与工程应用

涂劲 编著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路6号;电话:010-68331835 68357319)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村1号;电话、传真:010-82000893)

北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

中国水利水电出版社微机排版中心排版

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32开 5.5印张 143千字

2007年12月第1版 2007年12月第1次印刷

印数:0001—2100册

定价:15.00元

ISBN 978-7-5084-5148-0

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码100044,电子邮件:sales@waterpub.com.cn)



涂劲 女，工学博士，中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心高级工程师。1996年毕业于哈尔滨建筑大学结构工程专业，获工学硕士学位；1999年毕业于中国水利水电科学研究院研究生部水工结构专业，获工学博士学位；2000-2002年在中国地震局工程力学研究所土木工程博士后流动站地震工程及防护工程专业完成博士后研究工作。1999年至今在中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心从事水工抗震科研工作，其间结合国家重点水电工程，作为技术骨干完成多项国家科技攻关重点项目、国电公司重点项目、国家自然科学基金项目等科研工作。发表论文20余篇，获部级科技进步奖3项。

序

在 当前我国大力开发作为可再生清洁能源的水电资源的大好时机，一系列重要的高混凝土拱坝和重力坝正在加速建设中。由于我国水能资源主要集中在西部高地震烈度区，因此，混凝土坝的抗震安全成为这些大坝工程设计中的关键技术问题。混凝土坝的抗震分析涉及地震动输入，坝体-地基-库水的动态相互作用，坝址地形、地质条件的影响，以及混凝土材料的动态特性等复杂因素，许多都有待深入探讨，因而在实际工程的设计中不得不作出一定的假设和简化，并且在相当程度上要依托工程实践经验和类比，经综合分析后作出决策。近年来，随着计算机技术的飞速发展和相应的数值分析理论和方法的重大进展，使混凝土大坝抗震的数学模型得以逐渐计入上述一些关键因素而使之更加贴近工程实际，求解方法也不断改进而更为精确、有效。使混凝土大坝的抗震数值分析跃上了一个新的台阶，为其抗震安全性的评价提供了进一步的科学依据。

本书作者所在的中国水利水电科学研究院，多年来紧密结合实际工程抗震设计中急需解决的关键技术问题，通过多次国家重点科技攻关项目和有关部门及所属设计和工程单位的支持和协作下，在所形成的团队集体共同努力和长期积累

下,对混凝土大坝抗震安全有关的关键技术进行了贴近工程实际的不断探索,成果在众多工程的抗震设计中被广泛应用。本书作者亲身参与了不少工程的抗震数值计算分析和研究工作。特别在应用人工透射边界和动接触理论对混凝土大坝-地基体系作有限元建模和非线性波动问题的显式求解方面,积累了较多的实际工作经验和体会。本书第1~第3章概略介绍了混凝土大坝抗震数值分析的概况及常规分析和有限元动力问题求解的基本原理和方法;第4~第6章阐述了混凝土大坝-地基体系的非线性地震波动反应分析步骤和抗震安全评价方法。最后给出了一些工程的实例数值分析成果。本书内容翔实、论述清晰明确,可以为从事混凝土坝建设的工程设计人员及高校有关专业的师生提供参考。

鉴于地震作用的不确定性和混凝土高坝结构和抗震性状的复杂性,目前在混凝土坝的抗震数值分析中,无论是地震动输入、数学模型的改进和参数取值,以及混凝土材料的本构关系和强度特性等方面都还存在着很多有待深入研究的问题。特别是其抗震分析的成果和初步结论尚待试验和震例的验证,而目前正在建设中的一系列大型高混凝土坝的抗震设计缺乏工程先例,更少遭受强震考验的实例。科技进展迅速而无止境,期待在这方面有更多的研究成果和专著发表,相互切磋,以更好满足我国当前在强震区建设高混凝土坝工程的急需,并推动坝工抗震学科的更快发展。

中国工程院院士

陈厚群

2007年11月7日

前言

我 国的水电建设正迎来前所未有的蓬勃发展时期，一批高坝大库已经开工建设或即将兴建，而在这些在建或拟建的混凝土大坝中，有许多大坝处在强震高发区，这些混凝土大坝的抗震设计就成为工程设计中极为重要的一个环节，混凝土大坝抗震安全性分析与评价也日益为工程界所深切关注。随着水电开发步伐的加快，大坝建设中的挑战性工程接连出现：从小湾拱坝设计坝高 292m，设计基岩峰值加速度 $0.308g$ ；溪洛渡拱坝设计坝高 278m，设计基岩峰值加速度 $0.321g$ ；锦屏一级拱坝设计坝高 305m，设计基岩峰值加速度 $0.197g$ ，且坝址地质条件极为复杂；大岗山拱坝设计坝高 210m，设计基岩峰值加速度达到史无前例的 $0.56g$ ；而拟建的鲁地拉碾压混凝土重力坝也达到最大坝高 140m，计基岩峰值加速度达到 $0.36g$ 。传统的大坝抗震分析理论和方法很难满足这些复杂工程的抗震设计要求，亟需建立能够反映影响大坝地震响应的诸多复杂因素作用的大坝抗震数值分析方法及相应的大坝抗震安全性评价体系。

在地震动过程中，无限地基辐射阻尼影响、坝基不均匀地震动输入、坝体混凝土材料的损伤及开裂、坝体及基岩中各类缝面的接触非线性特

征,坝基中可滑动岩块的滑移与坝体变形的相互作用等都使得大坝的地震响应分析成为包含了一系列极为复杂因素的非线性动力学问题,而这些因素本身又相互作用,需要同时考虑,更增加了数值求解的难度。为建立将坝体-库水-地基作为整个系统,同时能考虑上述多种复杂因素的数值分析方法,本书作者及所在的中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心在集成地震波动分析方法、接触边界的动接触力计算模型等力学前沿研究成果的基础上,针对混凝土大坝的工程特点和需求,研发了成套的计算方法和程序,并结合多座重要的混凝土大坝工程的实际运用,建立了相应的大坝抗震安全评价思路和准则。同行学者在大坝抗震分析领域也作了大量卓有成效的研究工作,殊途同归,共同的目的都是为我国的混凝土大坝抗震设计服务,因此作者希望通过本书,把我们近年的研究工作归纳与总结,与工程设计人员和从事混凝土大坝抗震研究的专家学者共同切磋。

本书第1章概述了混凝土大坝抗震数值分析研究的现状及相应有限元软件的开发应用情况;第2章介绍了常规的混凝土重力坝和拱坝的抗震分析方法及安全评价方法;第3章简要阐述了有限元法的基本原理及动力学问题的求解方法;第4章详细介绍了基于波动理论的非线性开放系统地震波动反应分析方法;第5章则介绍了模拟接触边界接触非线性特征的动接触力模型,并结合在混凝土大坝分析中的实际需要,建立了各种特殊情况下的计算方法;第6章建立了混凝土大坝抗震数值模拟的总体计算模型和从理论上阐述混

凝土大坝-地基体系整体抗震稳定安全评价方法；第7章结合工程实例，介绍了其实际应用与计算分析成果，并从部分分析成果中总结出对于数值分析方法改进与运用、安全评价体系形成方面的初浅认识；第8章是作者对今后混凝土大坝抗震数值分析研究工作的几点展望。

书中许多研究成果是在由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的科研团队的共同努力下取得的，在此由衷感谢陈厚群院士及所有同仁的指导和帮助。工程实例中的基础资料则是由中国水电顾问集团成都勘测设计院、昆明勘测设计院、西北勘测设计院和东北勘测设计院等协作单位提供的，作者在此对有关单位和个人深表谢意。

感谢国家自然科学基金重点项目90510017资助；感谢“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”之课题1“丹江口大坝加高工程关键技术研究”的资助。

承蒙陈厚群院士百忙之中为本书拨冗作序，中国水利水电出版社阳淼副总编和彭天赦编辑认真编辑文稿并提出了宝贵的修改意见，在此一并致谢。

由于作者水平所限，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

2007年11月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 混凝土大坝抗震分析研究概况 /3

1.2 坝体-地基体系动力分析有限元

软件开发及应用 /10

参考文献 /12

第 2 章 混凝土大坝常规抗震分析方法 14

2.1 混凝土重力坝常规动力分析方法 /14

2.2 拱坝常规动力分析方法 /23

2.3 基于概率极限状态设计原则的

大坝抗震安全评价 /33

参考文献 /34

第 3 章 有限元法基本原理及结构动力

学问题的有限元法求解 35

3.1. 有限元法基本原理 /35

3.2	运动方程	/39
3.3	振型叠加法求解结构动力反应	/41
3.4	直接积分法进行结构动力响应时程分析	/45
	参考文献	/48
第4章	地震波动反应分析方法	49
4.1	模拟波动的力学模型及求解思路	/49
4.2	内节点运动方程求解	/51
4.3	人工透射边界	/55
4.4	散射问题的输入技术	/64
4.5	近场波动数值模拟	/65
	参考文献	/68
第5章	动接触问题求解方法	69
5.1	接触问题的边界约束条件	/69
5.2	罚函数法与拉格朗日乘子法	/70
5.3	动接触力模型	/72
5.4	结合工程实际需要的改进	/79
	参考文献	/82
第6章	混凝土大坝抗震数值模拟体系	83
6.1	非线性问题求解的静动组合计算方法	/84
6.2	混凝土大坝-地基体系抗震分析的 有限元计算模型	/87
6.3	输入地震波的确定	/93
6.4	新的拱坝-地基体系整体抗震稳定 安全评价方法	/95
	参考文献	/98
第7章	工程应用实例	100

7.1	含纵缝的重力坝坝体地震响应分析	/100
7.2	考虑坝基交界面开裂的混凝土重力坝 地震波动反应分析	/106
7.3	考虑横缝的高拱坝地震响应分析及 抗震钢筋作用模拟	/117
7.4	高拱坝抗震分析中设置阻尼器的 模拟研究	/125
7.5	拱坝静动力分析中自重施加方式的研究	/136
7.6	高拱坝坝体-地基体系整体抗震安全 分析及评价体系工程应用	/145
	参考文献	/161
第8章	展望	163

第1章 绪 论

我国国民经济的发展对电力建设提出了日益增长的需求，水电是一种可再生的清洁能源，水电工程往往还兼有防洪、灌溉、航运和供水等综合利用效益，因此水能资源在能源结构中应该是优先开发的资源，迅速发展水电对我国能源建设具有重要的战略意义。我国水能资源十分丰富，全国可开发的水能资源达3.7亿kW，其中70%~80%都集中在西部地区^[1]，这是西部开发中突出的资源优势，西部水利资源的开发对于拉动西部经济，促进“西电东送”具有重要作用。我国西部地区多高山，淹没和移民少，宜于修建高坝大库。然而，西部地区为地中海—喜马拉雅地震带所经过，是亚欧大陆上最主要的地震带，是我国大陆地震活动最显著的地区。我国已建成的青海省龙羊峡拱坝（坝高178m）、四川省二滩拱坝（坝高240m），近期已开工建设的云南省小湾拱坝（坝高292m）、四川省和云南省交界处的溪洛渡拱坝（坝高273m）及向家坝重力坝（最大坝高161m），以及其他正在进行前期工作的大型混凝土拱坝或重力坝的工程设计烈度都高达Ⅶ或Ⅷ度，因此，考虑地震荷载组合的工况成为大坝设计的控制工况^[2]，抗震性能成为保证工程安全的关键。这些高坝一旦发生重大震害，不仅工程本身将遭受巨大损失，其次生灾害的后果更是难以估量，因此大坝的抗震安全问题为工程界和社会公众所深切关注。近半个世纪以来，在大坝的抗震安全设计中，数值模拟技术的应用起到了越来越重要的作用。同时，我国蓬勃发展的水利水电建设事业也为大坝静动力响应的数值模拟技术的发展提供了重要的机遇和应用前景。

现代混凝土大坝有重力坝和拱坝两种形式。

重力坝是一种古老而重要的坝型，长久以来为全世界广泛采用。现代混凝土重力坝是由混凝土修筑的大体积挡水建筑物，其基本剖面是直角三角形，整体由若干坝段组成。重力坝在自重、水压力和其他荷载作用下需满足稳定要求（主要依靠坝体自重产生的抗滑力来满足）和强度要求（依靠坝体自重产生的压应力来抵消由于水压力所引起的拉应力来满足）。其主要特点如下：安全可靠，失事率低；设计、施工技术简单；对地形、地质适应性好；容易解决施工导流和永久性泄洪问题。一般而言，重力坝具有良好的抗震能力，只要在设计中能适当考虑抗震问题，施工中保证质量，重力坝是能够经受强震考验的。但是，从国内外已有的经受过强震作用的混凝土重力式高坝（包括大头坝等），如我国新丰江大坝、印度柯依那（Koyna）大坝以及伊朗 Sefid Rud 大坝等的震害实例来看，这类大坝虽然未出现整体失稳或毁坏的情况，但却在上部出现了上下游贯穿性的裂缝^[3]，这一现象说明高重力坝存在其抗震的薄弱部位，因此需要在抗震设计和分析中予以关注。

拱坝是利用河谷地形建造的一种大型壳体结构，利用拱壳结构合理的应力分布来抵挡水、砂压力及各种荷载，主要依靠材料的各种强度来保证大坝安全。其主要特点如下：为高度超静定结构，具有相当强的自身调节能力，有较高的工程安全度；能充分发挥材料特性，混凝土方量小，建设工期较短，经济性好。从抗震角度而言，拱坝属空间结构，地震荷载能在拱、梁系统中调整，具有良好的抗震能力。尽管如此，鉴于问题的复杂性和拱坝一旦失事其后果的严重性，对高拱坝的抗震问题，必须给予足够的重视。迄今为止，国内外拱坝遭受震害的实例并不多见，尤其是修建在强震区的坝高在 200m 以上的高拱坝经受强震作用的实例就更少。正是由于缺乏工程实例的借鉴，在我国西部地区在建和待建的高拱坝的规模、难度和复杂性都属世界前列，其工程抗震设计将面临严峻挑战，也给工程抗震学

科提出了许多亟待解决的前沿课题。

1.1 混凝土大坝抗震分析研究概况

大坝抗震分析的计算方法经历了静力法、拟静力法和动力法三个发展阶段。最初的静力法假定地震对坝体的影响可以用等效的静荷载代替,这一静荷载的大小相当于地震加速度 a 所产生的惯性力,在计算中直接将它与水压、自重等荷载相叠加。静力法将坝体视为刚体,既不考虑地面运动的特性,也不反映结构物本身的固有动力特性。20 世纪 30 年代初,美国学者通过以动力理论为基础,对各类坝体的抗震特性进行详细研究并加以概括,提出一个静力形式的地震荷载分布,再按常规的静力分析方法进行坝体地震反应分析,这就是拟静力法。拟静力法已在一定程度上考虑了地面运动、结构动力特性等,但是,它仅仅是动力反应的一种粗略估算,不能计算地震中坝体的动力反应过程。这一方法虽不够精确,但简单、明确,易于获得定量成果,而且有较多实践经验,它与地震烈度分区、设计加速度的选择和设计方法、应力控制标准等相配套,能满足工程设计的要求,在相当长的时间内在世界各国得到了广泛应用。进行动力分析是大坝抗震设计必然的发展方向,我国于 2000 年颁布实施了基于可靠度原则和完全动力分析理论的《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073—2000),虽然其中分别将材料力学的悬臂梁法和结构力学的动力拱梁分载法作为重力坝和拱坝的抗震分析基本方法,但对工程抗震设防类别为甲类或结构复杂或地基条件复杂的大坝,建议宜进行有限元法动力分析。由此可见,动力有限元分析能够更为精确、更为深入反映各种复杂因素的影响,揭示大坝的地震响应。近年来,结合国家重点科技攻关项目,高坝抗震问题的有限元数值模拟方法从理论到应用,都取得了较大的进展,本书主要介绍这方面的最新研究成果。

以下是关于混凝土大坝抗震动力分析中几个重要问题的研究进展。

1.1.1 坝体-地基-库水动力相互作用

作为大体积的挡水建筑物，混凝土大坝坝体-地基、坝体-水体的动力相互作用都将对大坝尤其是高拱坝的动力响应带来复杂的影响。因此，坝体-地基-库水动力相互作用自 20 世纪 80 年代以来就成为水工抗震研究的热点问题。在这方面的研究中，人们开发了各种各样的数学力学模型，并结合现场振动测试以及实验室振动台动力模型试验进行验证和研究，取得了大量研究成果。

坝体-地基相互作用问题实际包括两个方面：一方面是如何合理描述和确定地震波输入方式；另一方面是如何有效模拟地震能量向无限远域的逸散，即所谓辐射阻尼作用。

各国学者对地震波输入方式问题展开了大量深入的研究，提出了不同的分析模型，概括起来可分为以下 4 种：

(1) 有质量地基均匀输入模型。这种模型，截取有限范围的基础，边界固定，在人工截断边界处输入均匀地震动，地基作为有质量的弹性体。该输入方式将在出露基岩表面的设计地震动人为地作为深部基岩的均匀地震动，与设计地震的含义相悖，导致地表运动和大坝地震反应被人为夸大，已有研究成果表明，这种夸大可高达 20%。同时，这种输入方式与地基范围的大小有关，人为不确定性因素大，显然不能正确地反映地震时的实际状态。因此，目前大坝抗震研究和设计中已基本不再采用这种模型。

(2) 无质量地基均匀输入模型。这种模型，基础范围的截取、人工截断边界条件的处理以及地震动的输入方式与有质量地基输入时的原则相同，但地基岩体质量人为假定为 0，即仅计入地基岩体的弹性作用而不计算其惯性作用。由于假定的地基质量为 0，在深部基岩人工边界处输入的地震动不会造成沿高程的人为放大，从而在整个坝基交界面处的地震动都与地表运动一致，同时，这样的处理也可避免基岩范围的任意性对坝体自振特性的影响。由于该方法概念明确，处理方便，又不失合理

性,因此在大坝的抗震分析中得到了广泛应用。然而对于高拱坝来说,由于河谷间建基面空间尺度大,一般坝基岩体远非均匀,实际上坝基交界面处的地震动是不均匀的。因此,尽管无质量地基是一种很巧妙的处理方式和工程实用方法,但是依然无法反映地震动的非均匀性影响。

(3) 反演-正演输入模型。这种模型,假设基岩为水平分层的、向两端无限延伸的均匀弹性介质(考虑基岩质量),将地表岩石的设计地震动按一维反演方法反演至深部基岩,将反演得到的深部基岩运动作为输入,正演求得基岩和坝体的地震反应。从理论上讲,这种方法有其合理性,也能在一定程度上反映地基岩体沿深度方向上的不均匀性。但在正演求解体系反应的过程中,往往只能采用四周均为有限的地基模型,无法反映无限地基辐射阻尼作用的重要影响,因此,亟待进一步完善。

(4) 自由场输入模型。这种模型,将坝体-地基系统分解成自由场系统(坝不存在)和附加结构系统(仅包含坝),针对自由场系统,根据反演-正演方法和其他方法求出坝基面的自由场运动,然后将其作用于坝基交界面上,连同附加结构系统建立整个体系在自由场运动下的运动方程。该方法理论上是严谨的,但关键的问题还在于,近坝区的河谷形状及岩体地质条件十分复杂,而河谷自由场运动也难以真实反映地震时河谷的实际运动状态,而且该方法也不能反映无限地基辐射阻尼作用的影响。

以上4种地基模型均建立在有限地基基础之上,无法反映地震动能量向无限地基逸散的所谓辐射阻尼作用的影响。由于这种地震能量向无限远域的逸散会降低结构的地震响应,类似一种阻尼效应,因此习惯上称之为辐射阻尼。计入这种辐射阻尼影响的实质是在有限范围地基的人工边界处如何实现地震波无反射。

要模拟无限地基,最简单直接的方法是采用远置边界。因为从理论上说,当无限地基介质中波速为 c ,地震作用持时为 T 时,只要使得人工边界距结构的距离 $L \geq cT/2$,则结构的反应