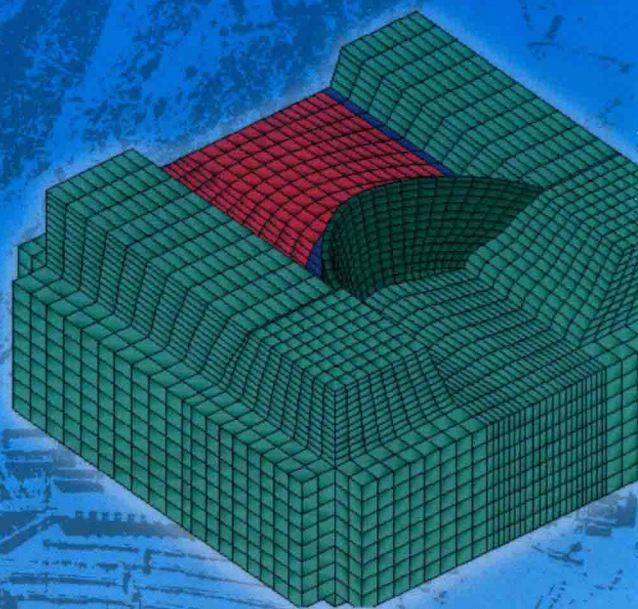


复杂地基上混凝土高拱坝抗震性能研究

李树山 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

复杂地基上混凝土高拱坝 抗震性能研究

李树山 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书从大坝-库水动力相互作用、地震波的非平稳特性以及黏弹性地基模型影响这3个方面展开研究,对混凝土高拱坝抗震性能进行了探讨和分析,希望对混凝土高拱坝的抗震研究提供有益的借鉴。

本书适合从事混凝土高拱坝抗震性能研究的相关读者参考。

图书在版编目(C I P)数据

复杂地基上混凝土高拱坝抗震性能研究 / 李树山著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5170-5917-2

I. ①复… II. ①李… III. ①高坝—拱坝—混凝土坝—抗震性能—研究 IV. ①TV642.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第236240号

书 名	复杂地基上混凝土高拱坝抗震性能研究 FUZA DIJI SHANG HUNNINGTU GAOGONGBA KANGZHEN XINGNENG YANJIU
作 者	李树山 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	虎彩印艺股份有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 207千字
版 次	2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷
定 价	39.00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

前言

拱坝作为主要坝型之一，其优越性已得到广泛认可。在西部水电开发过程中，混凝土高拱坝占有重要地位。西部地区存在着地震烈度很高、地震频发的问题，高拱坝抗震安全成为亟待解决的工程技术难题和学科前沿问题。本书从大坝-库水动力相互作用、地震波的非平稳特性以及黏弹性地基模型影响 3 个方面展开研究，对混凝土高拱坝抗震性能进行了探讨和分析，希望对混凝土高拱坝的抗震研究提供有益的借鉴。本书主要研究内容如下。

1. 大坝-库水的动力相互作用分析

探讨坝体和库水流固耦合动力相互作用的数值分析方法。建立适当简化而又不失准确性的模拟库水动水压力的计算方法。结合工程实际情况，采用水体附加质量来考虑水体的动力作用，并利用现有有限元软件的二次开发功能建立数学分析模型，分析影响坝面动水压力的主要因素。

2. 地震动输入机制对高拱坝的地震反应影响分析

采用时-频联合分析的自适应谱方法分析强震记录，从中提取时-频非平稳信息，以确定演变随机过程模型中确定性调制函数的参数，分别模拟出均匀调制地震加速度时间过程和演变调制地震加速度时间过程，并将其应用于具体工程中的地震反应分析中，评价地震动频率非平稳特性对高拱坝振动响应的影响。

3. 地基-大坝的动力相互作用分析

详细论述黏弹性人工边界方法，探讨地震波的输入方法，结合现有有限元分析软件实现黏弹性人工边界的数值模拟，比较分析固定边界条件和黏弹性边界条件下拱坝在地震荷载作用下的动力响应。

本书作者为华北水利水电大学副教授李树山。华北水利水电大学博士生导师解伟教授、刘祖军副教授对本书的编写提出了宝贵的意见，在此致以衷心的感谢！

本书得到了国家自然科学基金项目（U1404526）、郑州市科技领军人才支持计划（112PLJRC354）的资助。

由于作者水平有限，本书难免存在着不足之处，衷心希望本书读者提出宝贵意见和建议。

作者

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义与背景	1
1.2 地震动输入机制的研究进展	2
1.3 大坝与无限地基的动力相互作用	3
1.4 大坝与库水的动力相互作用	6
1.5 本书的主要研究工作	9
第 2 章 坝体-库水系统流固耦合动力分析	11
2.1 坝体-库水系统动力耦合控制方程	11
2.1.1 流体运动基本方程	11
2.1.2 流体域的有限元离散格式	13
2.1.3 坝体-库水流固耦合系统有限元方程	14
2.2 流固耦合方程的求解方法	15
2.2.1 积分格式和求解方案的选择	15
2.2.2 基于广义 Newmark 法的交错迭代法	16
2.3 库水附加质量模型	18
第 3 章 拱坝-库水耦合系统中水体对坝体动力特性的影响	20
3.1 水体附加质量模型	20
3.2 流固耦合计算模型和水体附加质量模型的建立	21
3.2.1 两种模型的动力特性分析	22
3.2.2 两种模型的动力时程分析	28
第 4 章 地震波非平稳特性对拱坝振动的影响	50
4.1 时间信号的时-频联合表示方法	50
4.1.1 短时傅里叶变换	50
4.1.2 拟正交的 Gabor 展式	51
4.1.3 小波变换	51
4.2 时-频联合非平稳地震波的合成	52
4.2.1 自适应谱分析的基本理论	52

4.2.2 基于自适应谱方法的时-频联合非平稳地震动的合成方法	53
4.3 合成非平稳地震波的频谱特性分析	60
4.4 频谱分布特性对拱坝抗震性能的影响	62
4.4.1 非平稳地震波的小波分解	62
4.4.2 拱坝不同分解波作用下的动力响应	65
第5章 黏弹性人工边界模拟和地震波的输入	93
5.1 地震波波动方程	93
5.2 黏弹性边界条件理论与方法	95
5.2.1 二维黏弹性人工边界	95
5.2.2 三维黏弹性人工边界	96
5.2.3 三维黏弹性静动力统一人工边界	98
5.3 黏弹性人工边界在 ANSYS 中的实现方法	99
5.3.1 常规实现方法	99
5.3.2 本文对该方法的改进	99
5.4 地震波的输入方法	100
5.4.1 等效边界力法	101
5.4.2 波场分解法	101
5.4.3 波场分解法的地震输入荷载程序的编制	103
5.5 拱坝在不同地基模型下的动力响应	115
5.5.1 动力时程响应	116
5.5.2 无质量地基模型和黏弹性地基模型的计算结果分析	116
第6章 研究结论与展望	130
6.1 研究结论	130
6.2 研究展望	131
参考文献	132

第 1 章

绪 论

1.1 研究意义与背景

拱坝是大坝中应用非常广泛的一种坝型。拱坝既有拱的作用也有梁的作用，能够将其所承受的水平荷载一部分通过拱的作用传向两岸，另一部分，通过竖直梁的作用传到坝底基岩。由于拱坝的受力性能可以充分发挥混凝土材料抗压强度高的优势，从经济性角度来讲，拱坝与混凝土重力型坝相比，其混凝土用量少、造价便宜，国内一些专家认为，拱坝所需的坝体混凝土为同规模重力坝的 $1/3 \sim 2/3$ 。从安全性角度来讲，拱坝有承受巨大荷载的能力，而且拱坝具有高次超静定度，类似一种自紧式塞子，越压越紧，调整能力很强。由于拱坝的这些优点使其在世界范围内得到了广泛应用，尤以我国最为突出。我国有着非常丰富的水能资源，理论蕴藏量达 6.76 亿 kW，其中 80% 分布在西部地区，且开发利用率仅为 16%，开发潜力巨大，开发前景广阔。西部地区多为高山峻岭和峡谷，水量充沛，利用水头集中，易于修建调节性能好的高坝大库水利水电工程。随着经济的发展，为满足对水资源和绿色能源越来越多的需求，在党中央“西部大开发”和“西电东送”战略任务支撑下，我国丰富的水电能源的开发利用进入了一个空前的大发展时期。

西南地区水能资源丰富，但是西南地区位于太平洋板块和亚欧板块的交接处，地震强度和发震频率都很高，近代我国近 80% 的强震都发生在该地区，在这些高烈度地区修建高拱坝，坝址地质条件复杂，地震安全问题不容忽视。我国已建的一些大坝设计地震加速度幅值较高，如小湾拱坝为 $0.308g$ 、奚落渡拱坝为 $0.321g$ 、锦屏一级拱坝为 $0.197g$ 、大渡河上的大岗山拱坝为 $0.5575g$ 、金沙江上的龙盘拱坝为 $0.408g$ 。这些拱坝一旦遭受震害，其所造成的次生灾害后果将十分严重。历史上也出现过一些高坝遭遇强地震损害的实例，其中震害最为严重的一座是美国的 Pacoima 拱坝。该拱坝高 113m，在 1971 年的 San Fernando 地震（6.6 级）中受到了极强烈的震动。地震造成左坝肩下游处的岩体错动多达 20cm，左岸重力墩与坝块见横缝，张开了 1cm、深 14m。事后为提高左岸坝肩岩体稳定性进行了补强处理，打了 35 根后张式锚索。1994 年再次遭遇 6.8 级的北岭强震，坝体损伤比 1971 年更为严重，左岸支墩错动 47cm，左岸邻近坝肩的一条构造横缝产生了 5cm 的残留张开。中国台湾的谷关拱坝，高 85.1m，经历 1999 年的集集地震（7.6 级）后，在右岸坝顶距右拱端 2.5m 处发现一条裂缝，垂直穿过坝顶路面，在距胸墙约 5cm 处停止，该裂缝往坝体下游面延伸，在下游坝面形成长 25m 的斜裂缝，最大宽度约为 12mm。此外，秘鲁 Fraile 拱坝、意大利 Ambiesta 拱坝等遭遇过地震，发生过一些问题，但影响不大。

随着一大批高拱坝和超高拱坝在我国西部强震地区进行建设，拱坝的抗震安全评价面

临严峻的挑战,拱坝动力响应的影响因素包括材料非线性、无限地基辐射阻尼,坝体与库水的动力相互作用以及拱坝横缝等,因此研究这些因素对拱坝地震损伤破坏的影响,能够为目前高拱坝建设的安全性提供科学指导,因而具有非常重要的意义。由于拱坝抗震问题的复杂性,目前仍然存在一些尚未得到圆满解决而又备受关注的问题。

目前拱坝动力分析包括以下若干重要技术问题。

- (1) 地震输入机制对大坝抗震性能的影响。
- (2) 拱坝与无限地基的动力相互作用。
- (3) 坝体与库水的流固耦合相互作用。
- (4) 强震时拱坝横缝张合对大坝地震响应的影响。
- (5) 混凝土大坝的地震响应与地震损伤发展的数值模拟。
- (6) 大坝-地基系统的高性能仿真计算。

因此,很有必要对这些问题进行深入的探讨,发展新的计算方法和计算程序,以期更全面、更准确地对拱坝的抗震安全性能作出合理、科学的评价。本书在已有研究工作的基础上,考虑坝体-地基-库水三者联合作用的前提下,建立强震作用下拱坝动力振响应的分析模型,研究地震动输入机制对拱坝振动的影响。

1.2 地震动输入机制的研究进展

地震动输入机制对于混凝土坝的地震响应有很重要的影响。结构抗震分析和设计的合理性依赖于对输入地震动描述的合理程度。强震观测结果显示,地震动过程具有明显的非平稳特性。首先,从一个地震记录的外形(或包络线)来看,所有地震记录都有一个从开始震动,逐步增强,然后再衰减而趋于零的过程,一般将该现象称为地震地面运动的强度非平稳性;其次,即使是在同一个地震加速度记录上,不同时段的周期特性也有所不同。一般来讲,在加速度记录的开头一段,高频分量比较多,后面一段,即振动衰减而趋于零的一段,低频分量比较多,振动最强烈的一段,中频分量比较多。这说明强震加速度记录不仅在外形上具有强度的不平稳性,在周期(或频谱)特性上也具有不平稳性。一些学者已经指出,以往被忽略的地震动频谱非平稳特性对结构非线性响应和破坏不可忽略。

在过去的30年时间里,世界各国地震工程研究者已经对强烈地震动非平稳特性做了大量的工作。这方面的成果可以概括为一个被称为均匀调制(或平稳化)随机过程的数学模型。该模型将地震动过程 $a(t)$ 表示为一个确定的时间函数 $f(t)$ 与一个平稳随机过程的乘积,即 $a(t)=f(t)x(t)$ 。然而均匀调制模型只反映了地震动强度的非平稳特性,不能反映地震动频率的非平稳特性,以此模型为基础合成的人工地震波与真实地震记录有显著的差别。现在一般认为地震动的频率非平稳特性对结构的非线性地震反应有较大的影响,然而均匀调制随机模型只表达了地震动的强度非平稳特性,此模型无法考虑地震动频率非平稳特性对结构地震反应的影响,一直以来,由于处理非平稳随机信号方面存在困难,所以在进行地震反应分析时无法考虑地震动的非平稳特性。

近几年来,在信号的时-频联合分析技术方面取得了有效的进展,这为分析处理强地面信号提供了有效的方法。应用这一方法拟合的地震波可将频率的非平稳特性考虑进去,

将这一技术应用于大坝的抗震分析,可为实际工程抗震性能研究提供有益的技术支撑。时-频分析方法能同时在时域和频域内观察信号的演变,提供信号的局部时-频特征,因而不仅能分析平稳信号且能分析非平稳信号,时-频分析方法的有效性使其不仅在信号处理领域内得到了迅速的发展,而且在土木工程、防灾减灾、结构抗震分析及健康检测等领域都得到了广泛的应用。由于时-频分析方法的优点,很多学者将其应用于时-频非平稳地震波的模拟。由于实际中可得到的地震波记录非常有限,因而需要合成人工地震波。研究能反映地震波时-频非平稳特性且便于工程应用的模拟方法具有重要意义,主要思路是基于通过各种方法使模拟出的地震波与目标地震波的演变功率谱、傅里叶谱、反应谱或能量输入相一致。也有一些学者基于时频调制的三角级数模型,研究时-频非平稳的地震波。Conte 和 Peng 采用带参数的 Gammer 函数作为调制函数,将地震波模拟为若干个调制函数与平稳高斯过程乘积之和的 Sigma 振子过程,由短时 Thomson 多窗谱方法估计实际地震波的演变功率谱,使模拟的地震波与实际地震波的演变功率谱相同来确定参数。这种方法用到了复杂的 Thomson 多窗谱法及需通过复杂的拟合来确定参数,使其难以用于实际工程中。曹晖等利用小波系数与演变功率谱的关系,采用正交的 L-P 小波由实际地震波的时变功率谱计算小波系数,做逆变换产生地震波。在实际应用时可产生大量的地震波,然后选择与反应谱一致的地震波,但这样增加了工作量。Mukherjee 等分别利用频域紧支的 L-P 小波与傅里叶谱和反应谱之间的关系,将小波系数表示为每级频带内关于中心频率和带宽的调制函数,再根据用小波系数表示的地震波能量与相应频带内用目标傅里叶谱和反应谱表示的能量相等的原则修正小波系数,再做逆变换得到与目标谱一致的模拟地震波。虽然已有很多非平稳地震波的模拟方法,但没有一个标准来评价这些模拟方法的性能,且有的方法需要很大的计算量,不便于实际应用。

1.3 大坝与无限地基的动力相互作用

在拱坝动力分析研究之初,计算模型采用一定范围的有质量地基,地震波加在刚性基岩上,在人工边界上均匀输入。这就假定加在可变形地基地底部各点的运动均相同。在求不同的地震运动各给定分量的反应时,计算模型所有的边界采用相同的支撑条件。当地震震源直接位于基岩底下时,取均一基底运动是合适的,而当震源不是直接位于基岩底部时,将有显著的水平向波的传播效应时,地震波由于经过地基的传递而使其频率成分和强度等都和刚性基底运动不同了。而且由于地震的加速度都是在地表测量的自由场记录,若将其简单地移入到深部基岩作为地震输入,将造成地震波传过地基后的人为放大,从而过分夸大了拱坝与地基的响应,导致计算结果较之实际情况有显著的误差。后来为了对这一计算模型进行改进,Clough 建议用无质量地基模型,即计算模型仍包含一定范围的地基,但不计地基质量,在结构-地基动力相互作用系统中只起到弹簧约束的作用。这种方法虽然消除了有质量地基的放大效应,但是在地震反应分析中,加在刚性基岩的地震力能够立刻传到坝基面而不经任何波的传播过程,无法考虑地震波沿河谷的幅差、相差的影响,并且也无法考虑地基能量向无限远处逸散的辐射阻尼效应。

对于地震作用下拱坝-地基的动力相互作用问题,长期以来,地基的模拟是采用无质

量弹性地基，地震荷载则采用的是传统的均匀输入的地震作用模型。但是总结起来，传统的无质量地基分析方法主要存在以下3个问题：①实际地基是有质量的半无限体，地震波动能量将向无穷远处逸散，即无限地基的辐射对散射地震波动能量将起到一种逸散作用。无质量地基模型不能考虑这一现象。②对建于深山峡谷中、基底延伸很长、上下高差显著的高拱坝坝址，沿坝基交界面的地震动幅差和相差明显，忽视这种不均匀性对于空间整体作用效应明显的高拱坝将难以反映坝体的实际地震反应。③坝址局部基岩的地质情况通常是十分复杂的，除介质非均匀性外，节理裂隙、断层和弱软夹层在地震作用下可能进入非线性反应状态。这种坝址局部基岩岩体的非均匀和非线性对高拱坝的抗震分析有时是十分重要的。

另一类方法是一维的反演-正演输入模型，即将地震自由场记录反演到深部基岩，得到基岩的地震加速度时程，加上坝库系统后将反演结果施加于人工边界上，再通过向上正演的过程求得坝体的响应。这一方法消除了有质量地基对地震波的放大效应，并在一定程度上考虑了自由场的幅差、相差的影响。但是由于一维反演模型考虑过于简单，仍然没有较全面地反映地震波沿河谷的变化。真正从理论上解决这一问题的是 Clough 等提出的自由场输入方法。首先根据反演方法求出坝基各点的自由场历程，再将这种历程作用于坝基交界面上，用自由场运动方程求解坝体的反应。这一方法不仅考虑了坝库系统对自由场的反馈影响，也计及地基上各点的相位差，在理论上比较完整，但该方法要求给出河谷的自由场分布，进行三维的自由场反演是非常困难的，这也使得这一严格的数学模型仍在很大程度上建立在一个假想的输入基础上。

实际上在进行坝体-地基动力相互作用的数值模拟计算时，应注意到天然地基是无限延伸的，地震能量将会向无限远处逸散，而计算规模和计算效率的限制又使我们在模拟地基的无限性时遇到很大的困难。同时也应注意到，地震动是以波的形式入射到坝体-地基系统，地震荷载的输入机制也是一个非常重要的问题。因此，地震作用下坝体-地基动力相互作用最核心的问题可以归结为地基的合理模拟和地震荷载的输入机制这两个方面，如何有效正确地考虑这两方面的因素是决定能否更精确地模拟坝体系统地震反应的关键技术之一。

自20世纪70年代以来，随着电子计算技术的普及和不断发展以及相应发展起来的有限差分法、有限元法、边界元法、无穷元法等各种数值分析方法，相继出现了很多用于结构-地基动力相互作用数值模拟的计算方法。从数值分析类型来看，这些方法无外乎时域、频域或时-频联合算法。在频域分析中，可以较为方便地采用与频率相关的地基阻抗函数，进而利用早期关于地基弹性半空间的理论成果。而且从波动分析角度来看，地基中的地震波传播模式也与激振频率有很大关系，因此在频域中处理起来更为方便。但从频域分析难以处理非线性问题的角度看，时域求解算法更具研究前景。对比频域分析仅能给出结构的稳态幅值响应，时域分析更符合人们研究结构动力问题的习惯，可以给出结构-地基系统在地震作用下的瞬时响应。同时，地震波载荷及结构的动力响应均属于时间历程，因而时域数值分析能提供结构-地基体系的瞬时运动。比较频域数值结果仅相当于时域稳态响应，时域计算结果给予了更完备的响应信息。而在时域动力计算中，有限元法作为一种强有力的数值计算方法，其应用领域已经遍及各类物理场的分析。尤其在土木、水利、机械、航

空、航天、造船等工程技术领域的具体实践中，它已经转化为直接推动科技进步和社会发展的生产力，发挥着巨大的经济和社会效益。有限元法有很多公认的优点，就解决问题的广度和难度来说，它几乎无所不能。有限元法特别适应大规模问题的解决，不仅适用于复杂的结构形式及场地特性。也可处理结构的各类非线性问题，并且有较好的解的稳定性和收敛性。以下结合已有文献成果进行简要介绍。

1. 无穷元法

无穷元是外部区域向无穷远处延伸的辐射状窄条。其概念最早是由 Bettess 和 Zienkiewicz 提出，其基本原理是利用 Lagrange 插值函数和衰减函数的乘积来构造形函数，对于位移无穷元，一般要选择能反映位移衰减特征的衰减函数，以反映在介质中由近场至远域的位移分布规律。因此，对近场区采用有限元模拟，对无限延伸的远场区域采用无穷元模拟，就形成了一套考虑无限地基作用的结构反应分析方法，但它们只能处理均匀介质的无限域问题。我国清华大学的张楚汉、赵崇斌等将其引入到拱坝无限地基中来，进行地基刚度的计算，取得了初步的成果，并发现和无质量地基模型相比，无限地基的辐射阻尼对拱坝地震响应有着显著的影响，这种影响主要表现为降低坝体的动力反应值。赵崇斌等对原有的无穷元法进行了一定的改进，提出了一种具有边中结点的映射动力无穷元，其特点是先建立单元在整体坐标系与局部坐标系中的坐标映射关系，然后在局部坐标系中具体地进行分析，这一无穷元模式可以模拟横向非均匀介质中波的传播特性，也可以模拟不同成分波的传播机制。大连理工大学的林皋、陈健云等提出了类似的结构动力无穷元方法，将衰减函数直接定义在无穷元的结构上，再在单元内对结构进行插值生成单元的位移场。由于衰减函数的选取与所传播的波的频率是有关的，因此无穷元方法主要是在频域内建立的。

2. 边界元法

对于无限和半无限域中的波动问题，由于边界元法的基本解能够自动满足无穷远处的辐射条件，使它成为处理无穷边界问题的有效方法。另外，边界元法还具有两个独特的优点：①只需要对边界进行离散，使问题的维数降低一维；②只需要对边界积分方程进行数值积分，因此精度较高。Chopra 等利用边界元计算地基的动力刚度，然后与有限元耦合进行拱坝的动力分析。张楚汉、金峰等又提出了边界元-无限边界元耦合方法（BE-IBE），该方法采用全空间格林函数，无需离散自由地表。由于地基刚度是频率的函数，因此在时域分析中，需将所得到的频域中的动力刚度经曲线拟合法转换成时域三参数模型，形成作用在边界结点上的与频率无关的耦合的地基刚度、阻尼、质量矩阵，然后将它们分别组装到由有限元离散所形成的结构的刚度、阻尼和质量矩阵中，则可进行时域求解。该方法已经应用于很多实际计算中，得到了一些有价值的结论。

3. 人工边界条件

当用有限的地基离散模型模拟无限地基时，将在人工截取的边界上发生波的反射，从而引起波的振荡，导致模拟失真。解决这个问题最有效和最直接的办法就是引入人工边界条件。在计算模型边界上施加人工边界条件，是一种直接解法，它既能够模拟地震波在地基中的传播过程，同时还能反映出高拱坝与地基的交界面处和不同高程的地震动不均匀特性。人工边界条件也称为吸收边界或非反射边界，其目的是消除或者减少人工边界处反射

波的影响,较真实地反映无限地基的本来具有的振动能量向无限远处逸散的特性。若将地基的计算模拟范围 L 取得足够大,即取 $L \geq cT/2$, T 为计算时间, c 为无限域介质的最大波速,则结构反应在 $0 \leq t \leq T$ 的时段内将不受边界条件的影响,边界条件可以任意给定,这实际上也正是人工边界早期处理方法的远置人工边界。这种方法实际上是以计算效率为代价避开了边界的问题,虽然这种方法至今仍在各种人工边界条件的检验工作中用于提供精确地消除了边界影响的数值解,但是由于该方法计算量大,效率低,尤其对于大型的三维结构将对计算机的内存提出更高的要求,在目前阶段用以解决实际工程问题的难度非常大。为此许多学者提出了多种人工边界以解决有限截取模型边界上波的反射问题。人工边界条件可以分为全局人工边界和局部人工边界,全局人工边界虽然具有较高的精度,已经成功地应用于许多近场波动数值模拟中的线性问题,但是由于是空间域耦联的,计算量较大,特别是当广义结构具有非线性时,往往因其计算量过大而难以胜任。而局部人工边界条件的重要特征是时空解耦的,即一个边界结点在某一时刻的运动仅与其邻近结点在邻近时刻的运动有关,而与所有其他结点和其他时刻无关,这一解耦特性极大地简化了计算。为了减少计算量、提高求解效率,近 30 年来,国内外的学者陆续提出多种局部人工边界条件。其中比较有代表性的有黏性边界、旁轴边界、叠加边界、透射边界、黏-弹性边界等。其中黏弹性边界条件原理简单,精度比较高,便于和现有有限元软件进行结合,仅需在边界添加弹簧和阻尼即可实现,目前应用非常广泛。

黏弹性边界最早的研究工作开始于 Lysmer 和 Kuhlemeyer 在 1969 年提出黏弹性人工边界,该方法相当于在边界上施加一段固定的单向黏滞阻尼器,只能考虑边界阻尼的吸能作用,在应用中容易发生结构整体漂移,精度不高。1994 年,Deeks 和 Randolph 给出了二维平面应变问题的黏弹性边界表达式,开始了真正的时域解耦的黏弹性边界研究。在这之后,黏弹性边界受到国内学者的关注,并对其进行了广泛研究,刘晶波和吕彦东在 1998 年将平面应变膨胀波边界应用于二维平面问题的分析,并给出了黏弹性边界反射系数和一种有效外源输入方法,即把输入地震动转化为作用于人工边界上的等效荷载的方法来实现波动输入。杜修力在 2000 年提出了基于考虑散射波远场几何衰减的平面波建立黏弹性人工边界的思想,并与显式有限元法结合,建立局部解耦的时域波分析方法。王振宇在 2002 年进行了三维黏弹性边界的研究工作,利用极坐标球面波近似表达,建立了一种三维黏弹性人工边界。

1.4 大坝与库水的动力相互作用

坝体-库水系统在地震时的相互作用是水利抗震设计的重要课题。拱坝是三面受约束的空间壳体结构,在地震作用下,动态特性十分复杂。这不仅仅是由于拱坝本身的结构形式及边界件很复杂,更重要的是在坝体、库水、地基三者的相互作用下振动能量的转移,以及不均匀谷壁变化的波动效应影响下地震输入的逸散效应。坝体在地震作用下振动时,带动了库水的振动,在库水内产生附加动水压力,动水压力又反过来作用于坝体,改变了坝体的动力特性和动力反应,整个过程反映出强烈的流固耦合振动。尤其大型的高拱坝,振动频率低,径向变位大,库水对坝体振动的影响变得更加重要。因此,对于重要的高拱

坝, 必须考虑坝体与库水之间的相互作用对坝体动力特性和动力反应的影响。

坝体-库水系统在地震时的相互作用是一个典型的流固耦合问题。流固耦合力学是流体力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支, 它的重要特征是两相介质之间的交互作用, 变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动, 而变形或运动又反过来影响流场, 从而改变流体载荷的分布和大小。正是这种相互作用将在不同条件下产生各种各样的流固耦合现象。流固耦合问题一般具有以下两个特点: ①流体域或固体域均不可能单独地求解; ②无法显式地消去描述流体运动的独立变量或描述固体运动的独立变量。流固耦合可分为两类: 第一大类问题的特征是两相域部分或全部重叠在一起, 难以明显地分开, 使描述物理现象的方程, 特别是本构方程需要针对具体的物理现象来建立, 其耦合效应通过描述问题的微分方程来体现; 第二大类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相交界面上, 在方程上耦合是由两相耦合面的平衡及协调关系引入的。在耦合界面上, 流体动力及固体的运动事先都不知道, 只有在系统地求解了整个耦合系统后, 才可给出它们的解答。坝体-库水的耦合属于第二大类流固耦合问题。

对于地震作用下坝体承受的动水压力的计算, 前人已经做了很多有意义的工作, 也取得了很多重要的成果。在水利土木工程中, 一般认为 Westergaard 是研究坝-水耦合的创始人。20 世纪 20 年代末, 在美国地震活动区, 由于建设水坝的需要, 要计算作用于坝体承压面的附加动水压力, 为了满足实际工程中的这种需要, Westergaard 在 1933 年发表了他的著名论文, 给出了刚性重力坝在水平地震载荷下的动水压力分布, 其解至今仍为许多国家的坝工抗震设计规范所沿用。然而由于 Westergaard 解中忽略了坝体的弹性振动因素, 假定了刚性坝并给出了地面运动的规律, 因而其解本质上并未计及两相的耦合作用, 所研究的问题归结为求解了一个给定边界条件下的流体动力问题。Westergaard 的工作虽然存在许多假定, 只是实际重力坝和库水的一种理想化模型, 但该模型反映了动水压力的一些本质特征, 其重要意义在于提出了一个新课题, 对随后动水压力的研究和坝体设计无疑是具有启发性的。在 Westergaard 研究成果发表之后, 引起了大坝抗震研究者的广泛关注。许多研究者针对 Westergaard 模型的一些限制进行了讨论分析。后来 Chopra 对 Westergaard 公式进行了修改, 并提出了经验公式, 但由于计算水平的限制, 他实质上只是对 Westergaard 公式进行了局部的修改。1982 年 Clough 教授对 Westergaard 公式进行了推广, 使之能适应任意形状的坝体和河谷, 并可以考虑任意方向的地震加速度。由于附加质量的影响, 坝体的频率降低, 且附加动水压力与激振频率无关。研究表明, 附加质量降低了拱坝和重力坝的共振频率, 减小了阻尼比, 当坝体受到顺河向或竖直方向地震激励时, 由附加质量产生的动水压力会大大增大坝体的动力反应, 而对横河向地面运动的动力反应几乎没有影响。Clough 教授还导出了在采用有限元方法离散库水时, 计算动水压力的附加质量矩阵形式。一般情况下, 用有限元法得到的附加质量矩阵是一个满阵, 即在所有的力和加速度分量之间产生耦联, 这给求解这一问题带来很大的困难。为了解决附加质量矩阵是一个满阵给计算容量和计算效率上带来的困难, Kou、Fok 和 Chopra 在分析 Morrow Point 拱坝时提出了一种近似处理方法。该方法依据假定坝体为刚性时总动水压力保持相等的原则, 将附加质量矩阵对角化, 牺牲一部分分析精度来换取计算效率。

对于给定的坝体-库水-地基系统, 是否可以忽略库水可压缩性影响一直是一个有争议

的问题。与不考虑库水可压缩性相比,考虑库水可压缩性时的分析要复杂和费时得多。考虑库水可压缩性的影响之后,将使得原来所需求解的拉普拉斯方程转为相应的波动方程。求解过程也远为复杂,而更为重要的是,当考虑了水体的可压缩性影响后,使得所求得的动水压力和扰动频率发生关系,并造成扰动和反应之间的相位差,因此不能用附加质量的方式来求解方程。可压缩性带来的数值上的困难使人们不得不采用简化的方法,尤其是对于复杂的问题。在假定坝体和地基为刚性时,如果假定库水不可压缩,则坝面动水压力与激励频率无关,而如果考虑库水的可压缩性,当激励频率接近库水自振频率时,会发生共振,峰值趋向于无限值。这时不考虑库水可压缩性完全掩盖了问题的本质特征。库水共振现象曾引起许多研究者的极大关注,因为库水共振时的巨大动水压力将造成挡水结构的严重破坏。而一些实验和理论研究表明,库水共振时动水压力趋向无穷大的现象实际上是不存在的。这主要是因为水库底部不是严格的反射边界,振动能量被库底大量吸收的缘故。对这一问题有代表性的成果是日本学者烟野正的研究和实验。1958年烟野正进行重力坝原型的强迫振动试验中并没有发现共振现象。烟野正认为这是由于库底边界的可压缩性,使得入射到库底边界上的压力波并不是完全被反射回水中,而是一部分被反射,一部分被吸收。正是这种边界吸收的原因,使得动水压力没有出现共振峰值,由此可以看出理论模型中假定坝体和地基为刚性是不合理的。为了进一步证明这种观点,烟野正又进行了室内模拟试验。他在钢质水箱的底部及侧壁敷设沙粒垫层,然后使水箱经受强迫振动,发现波的反射近乎消失。在 Chopra 和其他学者早年的研究中发现,忽略水的可压缩性将导致显著的误差,过低地估计地震动水压力,特别是遭受强烈地面运动时,考虑水的可压缩性产生的动水压力比不计水的压缩性时要大得多。

最近几年的研究当中,尤其是在单纯考察动水压力大小时,很多学者都是考虑了水的可压缩性对动水压力的影响,把主要精力放在了新的数值求解格式的发展上,如晏启祥在传统 Wilson- θ 法的基础上,对 Wilson- θ 法进行了改进并分析了其稳定性,提出了基于改进的 Wilson- θ 法的流固耦合迭代算法。刘浩吾通过基于对 3 座拱坝现场迫振实验的理论分析,论证了库水可压缩性对动水压力的放大效应及其实现条件。基于波传播理论提出了水库边界反射吸收参数的算法,论证了模型试验用于动水压力测试的局限性。他的研究表明,高混凝土坝特别是高拱坝的抗震分析中在一定条件下应考虑可压缩性,但动水压力量值不会达到无限大。坝体-库水系统在地震时的相互作用的另外的问题是关于水体有限元截取的长度和库表重力波的影响。Kuo 等人在不考虑压缩性影响的条件下,提出了拱坝动水压力计算程序,并证明 3 倍于坝高的水库长度已能使结果达到理想精度。计算结果表明,有限元水库模型求出的动水压力与 Westerguard 模型比较,在拱冠处显著减少,在靠拱端附近却大些,而总的动水压力值前者较后者要小。处理带有表面波的流固耦合问题时,流体惯性矩阵通常是奇异的,这给很多方法的运用带来了困难,许多通用程序不得不忽略表面波的影响。为解决这一难题,晏启祥从流固耦合系统的位移和压强型有限元出发,利用伽辽金法获得了表面波影响矩阵,用改进的 Wilson- θ 法分析了流固耦合表面波的影响。计算表明,水深是决定表面波影响大小的主要因素之一,表面波影响范围主要在库水表面附近。

自从 Westerguard 的开创性研究开始,许多研究者都致力于分析坝面动水压力,建立

了多种分析模型，但没有一种模型包含了影响动水压力的所有重要因素，这样就有可能使得分析结果有一定误差。大量有关坝面动水压力研究的文献资料表明，目前比较认同的影响地震作用下坝前动水压力的影响因素归纳起来有：①库水可缩性；②水体有限元模型的模拟范围及库尾水体截断边界；③库水自由表面波；④库底吸收边界条件；⑤库水黏滞性；⑥水体和坝基的相互作用以及地震波方向等。随着数值计算条件的不断改善和技术手段的创新，对这些问题的研究虽然已经取得了很丰富的成果，但是对于这些因素的各自的影响究竟有多大，如何全面、真实、有效地反映动水对坝体地震反应的影响，还是有待于进一步研究的重要课题。尤其是对于复杂计算条件下的动水压力的模拟，目前普遍的做法更是作了很多的简化。因此，虽然结构与水体相互作用的研究已以有半个多世纪的历史，但并不能认为问题已经解决。

1.5 本书的主要研究工作

综上所述，由于拱坝抗震问题的复杂性，目前仍然存在一些尚未得到圆满解决而又备受关注的问题。因此，很有必要对这一问题进行深入的探讨，发展新的计算方法和开发新的计算程序，以期更全面、更准确地对拱坝的抗震安全性能作出合理、科学的评价。本书试图在前人成果的基础上，考虑坝体、地基、库水三者联合作用的前提下，建立强震作用下拱坝动力振响应的分析模型，研究地震动输入机制对高拱坝振动的影响以及大坝强震作用下的破坏形态。本书针对高拱坝抗震的3个主要方面展开研究。

1. 大坝-库水的动力相互作用分析

探讨坝体和库水流固耦合动力相互作用的数值分析方法。建立适当简化而又不失准确性的模拟库水动水压力的计算方法。结合工程实际情况，采用水体附加质量来考虑水体的动力作用，并利用现有有限元软件的二次开发功能建立数学分析模型，分析影响坝面动水压力的主要因素。

2. 地震动输入机制对高拱坝的地震反应影响分析

采用时-频联合分析的自适应谱方法分析强震记录，从中提取时-频非平稳信息，以确定演变随机过程模型中确定性调制函数的参数，分别模拟出均匀调制地震加速度时间过程和演变调制地震加速度时间过程，并将其应用于具体工程中的地震反应分析，评价地震动频率非平稳特性对高拱坝振动响应的影响。

3. 地基-大坝的动力相互作用分析

详细论述黏弹性人工边界方法，探讨地震波的输入方法，结合现有有限元分析软件实现黏弹性人工边界的数值模拟，比较分析固定边界条件和黏弹性边界条件下拱坝在地震荷载作用下的动力响应。

研究开发方案及技术路线如下：

(1) 利用时-频联合分析的自适应谱方法从强震记录中提取时-频非平稳信息，确定演变随机过程模型中确定性调制函数的参数，分别模拟出均匀调制地震加速度时间过程和演变调制地震加速度时间过程，并将其应用与具体工程中的地震反应分析，评价地震动频率非平稳特性对高拱坝的影响。

(2) 结合现有有限元分析软件实现黏弹性人工边界的数值模拟，探讨该人工边界条件下地震波的输入方法，通过数值算例比较分析固定边界条件和黏弹性边界条件下拱坝在地震荷载作用下的动力响应。

(3) 探讨在工程实际中以及在复杂计算条件下经常采用的利用水体附加质量考虑水体的动力作用，应用现有有限元软件的二次开发功能建立有限元分析模型，推导流体运动方程和坝库相互作用系统的有限元方程。建立适当简化而又不失准确性的模拟库水动水压力的计算方法。提出基于广义 Newmark- β 法的流固耦合方程的求解方法，分析了水体不可压缩情况下流固耦合方程的求解策略。研究了影响坝面动水压力的主要因素。

具体的技术路线如图 1.1 所示。

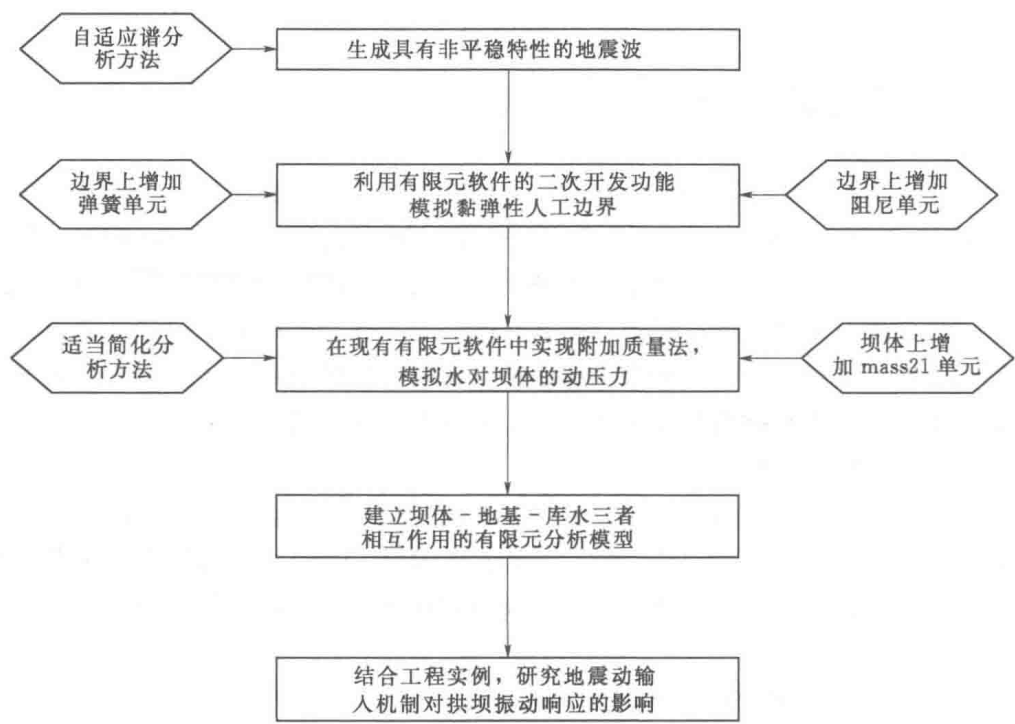


图 1.1 技术路线图