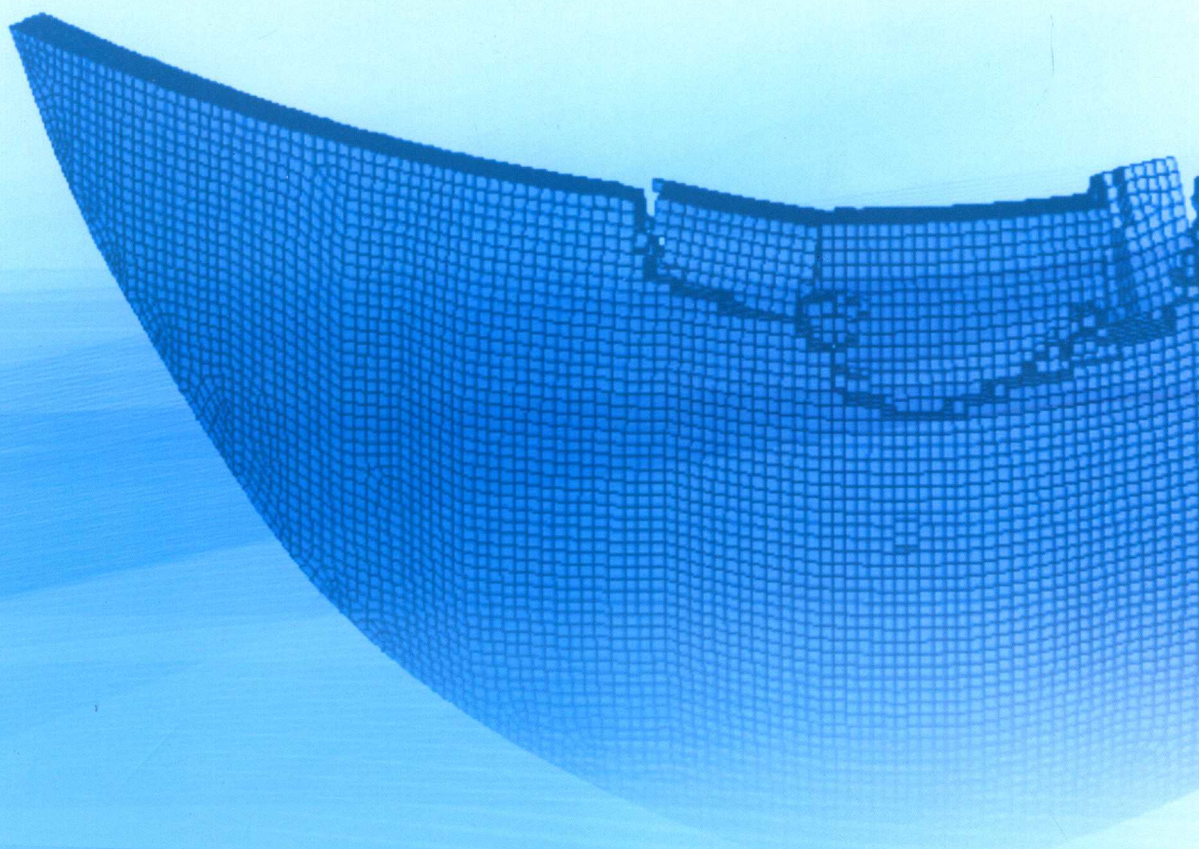


混凝土坝 强地震损伤破坏的 数值模拟

钟红 林皋 胡志强 李春雷 郭胜山 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

混凝土坝 强地震损伤破坏的 数值模拟

钟红 林皋 胡志强 李春雷 郭胜山 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

大坝的抗震安全是强震区建设高坝大库必须解决的关键技术问题之一。本书是关于混凝土坝地震非线性响应过程模拟的专著，介绍了考虑混凝土细观非均匀性影响的混凝土坝地震损伤破坏模型、混凝土拱坝和重力坝在强震作用下的灾变过程的模拟以及在此基础上开展的混凝土坝地震风险分析和抗震加固的模拟分析等内容。

本书可供力学、水利、土木、交通、港口、工业民用建筑等领域从事混凝土理论研究的科学研究工作者和工程技术人员阅读。

图书在版编目（CIP）数据

混凝土坝强地震损伤破坏的数值模拟 / 钟红等著

— 北京：中国水利水电出版社，2019.2

ISBN 978-7-5170-7492-2

I. ①混… II. ①钟… III. ①混凝土坝—大坝—地震灾害—数值模拟 IV. ①TV642

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第034588号

书 名	混凝土坝强地震损伤破坏的数值模拟 HUNNINGTUBA QIANGDIZHEN SUNSHANG POHUAI DE SHUZHIMONI
作 者	钟红 林皋 胡志强 李春雷 郭胜山 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	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 196千字
版 次	2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	35.00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

Preface

随着国民经济的发展,我国的水电工程建设在 21 世纪以来进入高峰期,一大批 200~300m 级的高坝在水力资源丰富但是地震活跃的西南、西北地区开工建设,无论从大坝建设的数量、规模还是技术难度来说,我国都居于世界首位。大坝抗震安全成为设计中需要解决的关键技术问题之一。

混凝土是由水泥、粗细骨料和水等物质拌和后养护形成的人工复合材料,力学性质极其复杂。从总体上来说,混凝土与岩石类似,都是准脆性材料。关于这类材料裂缝损伤发展的计算模型和数值计算方法的研究近年来取得了一定的进展,并在混凝土坝的静动力响应分析中发挥了一定的作用,但总的说来目前还处于探索阶段。

目前,关于混凝土坝非线性响应分析的模型主要分为三大类:第一类是基于塑性力学理论建立的模型,借鉴金属塑性模拟的经验,描述混凝土非线性中的塑性不可逆应变。第二类是基于断裂力学理论建立的裂缝计算模型,采用分离式模型或弥散型模型来模拟裂缝的起裂和扩展。第三类是基于连续介质损伤力学建立的裂缝计算模型,通过引入损伤变量描述介质损伤的渐进发展。这三类方法从理论层面及在大规模工程应用层面各有其特点和局限性。但目前来看,尚没有一种模型能合理地模拟混凝土坝在强震作用下从线弹性变形到产生裂缝再到破坏的全过程。

还有必要指出,这些计算模型中都将混凝土看作宏观均质材料。实际上,混凝土内部的细观结构极其复杂。当结构受力和变形都在弹性范围内时,宏观应力-应变关系符合线性规律,从而可将混凝土在宏观上看作均质材料。但如果需要研究混凝土结构的损伤演化问题,研究非线性产生的物理机制,材料细观组成的不均匀性就不可忽略了。

本书的研究工作借鉴了岩石破裂过程模拟(RFPA)的思想,在对结构进行足够细致的单元划分的基础上,通过单元材料参数的随机分布考虑混凝土细观尺度上非均匀性的影响,进而采用弹脆性损伤本构模拟单元的非线性。研究表明,采用较小尺度上的简单模型即可反映结构尺度上复杂的非线性损

伤破坏行为,实现对混凝土坝变形从连续到非连续的全过程模拟,并且计算效率高。由于高坝计算量大,开发了相应的并行计算程序,在4台PC机搭建的集群上实现了百万以上自由度的拱坝地震损伤破坏模拟,并进一步将这一算法应用于混凝土坝的地震风险分析研究,以及采用FRP对重力坝进行抗震加固的效果模拟。

本书的研究工作是第一作者在大连理工大学攻读博士学位和任职期间在林皋院士的指导下完成的,作者对林院士多年来的支持和关怀表示深深的谢意!对胡志强副教授、李建波副教授和刘俊副教授在本人在大连理工大学任职期间给予的支持和帮助表示诚挚的感谢。作者还要感谢大连理工大学唐春安教授、梁正召教授、东北大学徐涛教授在准脆性材料断裂过程模拟方面提供思路,感谢大连理工大学陈健云教授提供拱坝振动台模型试验资料,感谢火箭公司梁国平教授和刘韶鹏博士在并行程序开发方面提供的帮助,感谢大连理工大学硕士研究生李晓燕、王娜丽、陈文茹参与完成部分计算工作,感谢中国水利水电科学研究院李德玉教高为本书出版提供的支持。

感谢国家重点研发计划项目(2017YFC0404903)、国家自然科学基金项目(51579033、51009019、90510018、50139010)的支持。

本书的研究工作是对大体积混凝土结构地震灾变模拟方法的探索,有些具体的技术问题还有待进一步论证完善。书中存在的不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2018年10月7日

目 录

Contents

前言

第 1 章 混凝土坝震害与数值模拟方法	1
1.1 混凝土重力坝震害	2
1.2 混凝土拱坝震害	4
1.3 混凝土坝地震非线性响应计算方法	6
1.3.1 混凝土非线性计算模型	6
1.3.2 混凝土坝地震非线性计算模型	8
参考文献	9
第 2 章 考虑混凝土细观非均匀性影响的数值模型	13
2.1 引言	13
2.2 损伤力学和细观力学基本理论及现状	14
2.3 宏观均质假定基础上考虑混凝土细观不均匀性的混凝土坝损伤破坏模型	16
2.3.1 宏观均质假定基础上细观不均匀性的考虑	17
2.3.2 弹性损伤本构关系	20
2.3.3 动力非线性计算过程	23
参考文献	25
第 3 章 混凝土坝地震损伤破坏模拟	27
3.1 重力坝地震损伤破坏模拟	27
3.1.1 计算条件	27
3.1.2 计算结果	29
3.1.3 混凝土非均匀性和非线性的影响	33
3.1.4 动水压力和无限地基的影响	34
3.2 拱坝地震损伤破坏模拟试验一	35
3.3 拱坝地震损伤破坏模拟试验二	38
3.4 有缝拱坝的地震损伤破坏模拟	41
3.5 高性能并行计算在混凝土坝地震损伤破坏模拟中的应用	44
3.5.1 高性能计算平台	45
3.5.2 有限元并行计算程序	51

3.5.3 某拱坝—地基系统地震损伤破坏并行计算	55
参考文献	59
第4章 混凝土坝地震易损性分析	61
4.1 大坝震害等级划分方法	61
4.2 混凝土重力坝的地震易损性分析方法	65
4.3 工程实例分析	67
4.3.1 重力坝 A 的地震易损性分析	67
4.3.2 重力坝 B 的地震易损性分析	70
4.4 基于易损性的混凝土重力坝地震风险研究	71
4.4.1 地震危险性分析	72
4.4.2 地震灾害损失评估	78
4.4.3 地震风险分析方法	79
4.4.4 大坝地震风险评估	82
参考文献	83
第5章 采用 FRP 加固的重力坝地震响应模拟	85
5.1 计算模型	85
5.1.1 FRP 本构模型	85
5.1.2 交界面黏结滑移本构模型	86
5.2 FRP 加固混凝土梁的受弯破坏数值模拟	94
5.2.1 混凝土梁模型	95
5.2.2 数值模拟结果分析	96
5.3 FRP 加固混凝土坝的动力时程分析	103
5.3.1 计算模型	103
5.3.2 FRP 加固效果分析	104
5.3.3 FRP-混凝土坝界面力学行为影响分析	109
5.4 FRP 加固混凝土坝的拟静力分析	113
5.4.1 静力非线性计算方法	113
5.4.2 计算模型	114
5.4.3 FRP 加固效果分析	115
5.4.4 FRP 加固效果的统计分析	119
参考文献	124

第 1 章 混凝土坝震害与数值模拟方法

20 世纪 30 年代，以美国在科罗拉多河上修建胡佛大坝为标志，世界高坝建设进入了一个快速发展的时期。总的说来，世界坝工技术的发展可划分为 3 个阶段^[1]：①20 世纪 30—40 年代，建坝中心主要在美国，其代表作就是 222m 高的胡佛拱坝；②20 世纪 50—60 年代，第二次世界大战后，建坝中心转向欧洲。一大批结构新颖、技术先进的大坝型式先后在欧洲许多国家中出现；③20 世纪 90 年代以后，建坝中心转向中国。无论从建坝数量、建坝规模还是建坝难度来说，中国均居于世界前列。根据国际大坝委员会的资料，截至 2003 年，全世界 15m 以上的大坝总数达 49697 座，分布在 140 多个国家，其中中国 25840 座，占 50% 以上，居世界第一。

我国是世界上水能资源最丰富的地方，理论蕴藏量达 6.76 亿 kW，居世界第一位。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。西部地区多呈高山峻岭峡谷，且水量充沛、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大的需求，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一个空前大发展的时期。

地震是对人类造成重大威胁的自然灾害之一。地震灾害伴随着巨大的生命和财产损失。我国西部地区位于太平洋板块和亚欧板块的交接处，地震强度和发震频度都很高，近代我国近 80% 的强震都发生在该地区。在这种高烈度地区修建高混凝土坝，加之坝址地质条件复杂，地震安全问题不容忽视。这些坝一旦遭受震害失事，其次生灾害所造成的后果将十分严重。无论是坝的规模、难度还是复杂性而言，这些坝的抗震设计都面临着巨大困难，也给水工抗震学科提出很多亟待解决的重大前沿课题。表 1.1 列出了在建和拟建的

表 1.1 几座高拱坝的工程特性

名称	坝型	建坝河流	最大坝高/m	设计地震加速度/g
锦屏一级	拱坝	雅砻江	305	0.197
小湾	拱坝	澜沧江	292	0.308
溪洛渡	拱坝	金沙江	278	0.321
白鹤滩	拱坝	金沙江	277	0.325
龙盘	拱坝	金沙江	296	0.408
拉西瓦	拱坝	黄河	250	0.230
大岗山	拱坝	大渡河	210	0.5575
乌东德	拱坝	金沙江	265	0.27
金安桥	重力坝	金沙江	160	0.399
光照	重力坝	北盘江	200.5	0.123
黄登	重力坝	澜沧江	203	0.251



数座高混凝土坝的主要特征数据和地震设防水准。

1.1 混凝土重力坝震害

在世界范围内有 4 座重力坝和大头坝遭受了比较严重的地震震害。需要指出的是，这 4 座坝都进行过抗震设计。

我国的新丰江大坝，坝高 105m，坝基岩石为侏罗-白垩纪花岗岩。1959 年水库蓄水后不久，在库区发生有感地震，1961 年按Ⅷ度地震烈度对大坝进行一期抗震加固，水平向设计地震系数为 0.05，1962 年 5 月完成。1962 年 3 月 19 日发生 6.1 级强震，震中位于大坝东北 1.1km，震源深 5km，震中烈度Ⅷ度。当时水库水位 116.5m，最大水深 91.6m。在强震作用下，右岸 13~17 号坝段在高程 108.5m 附近出现长达 82m 的水平裂缝，贯穿上下游。左岸 2~5 号坝段也在同一高程出现水平裂缝。但与 13~17 坝段邻接的 10~13 号溢流坝段，坝高虽然大，但未出现裂缝（图 1.1）。电站引水坝段 6~9 号，坝最高，也未发现裂缝，估计与进水口闸墩加强有关。

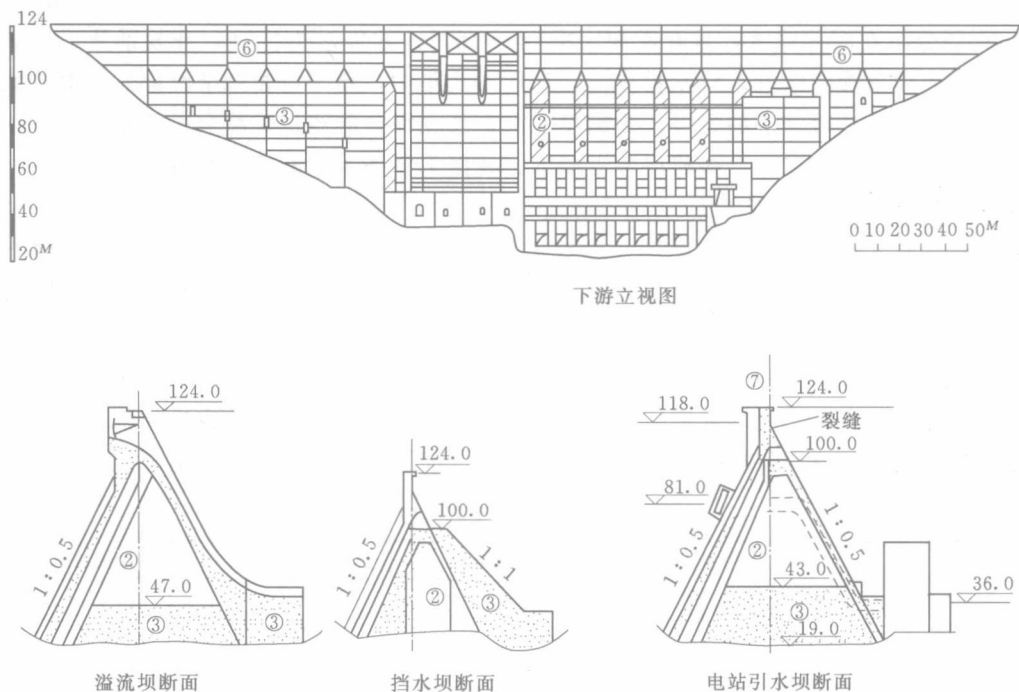


图 1.1 新丰江大坝及其震害表现

印度柯依那重力坝，坝高 103m，坝基为玄武岩。设计地震系数 0.05。1967 年 12 月 11 日发生 6.5 级强震，震中位于大坝以南偏东 2.4km，震源深处 8.0km，震中烈度Ⅷ度。实测坝基加速度为坝轴向 0.63g，顺河向 0.49g，竖向 0.34g。地震导致 13~18、25~30 等挡水坝段在坝断面转折处，即 628m 高程处出现水平裂缝（图 1.2）。潜水电视摄影发现上游坝面 622m 和 635m 高程处，特别是 628m 高程处也出现水平裂缝。虽无法准确判断裂缝

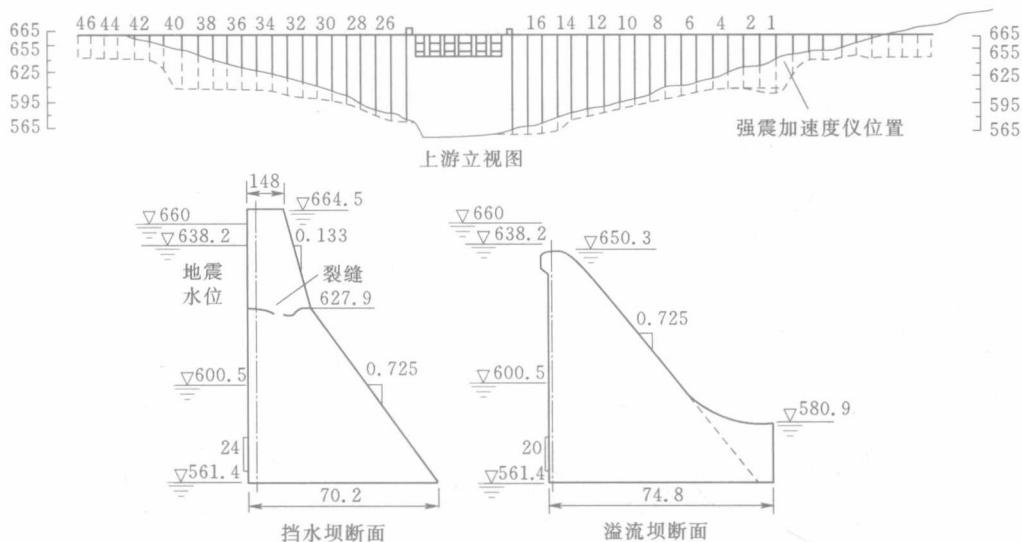


图 1.2 印度柯依那大坝及其震害表现

下游面是否贯通，但 26 号坝段下游面在 628m 高程处大量漏水，其他有 5 个坝段也有漏水痕迹。18~24 号溢流坝段则震害极为轻微，只有 18、24 号半跨溢流坝出现裂缝。

伊朗瑟菲德鲁特 (Sefid Rud) 大头坝，坝高 106m，坝基为安山岩和玄武岩。大坝按地震系数 0.25 进行过抗震设计。1986 年进行的抗震安全评价认为不存在结构稳定问题。1990 年 6 月 21 日发生的 7.6 级大地震，震中距坝址约 5km。坝址无仪器记录，相距 40km 处的强震仪记录到的加速度峰值为 0.56g，按地震动衰减规律估算的坝基加速度约为 0.714g。地震时水库接近满水位。地震造成坝的严重震害，有一条几乎贯穿全坝的水平裂缝，位于坝顶下 16m 高程处。虽然有的裂缝非肉眼所见，但只需通过水压试验即可发现。主要缝宽 10mm，最严重的震害发生在中央的 15 号坝段 (图 1.3)，有水平和斜向

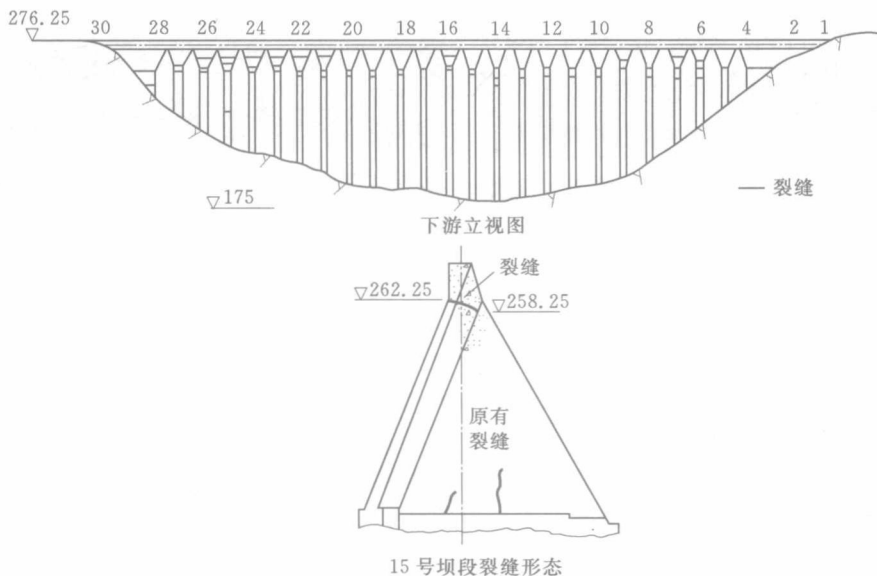


图 1.3 伊朗瑟菲德鲁特大坝及其震害



裂缝导致坝头向下游发生水平错动 20mm，裂缝张开造成严重漏水。坝顶钢筋混凝土栏杆全部或部分损坏。

台湾地区集集地震时，石冈坝因逆冲断层在坝下通过而遭到破坏。断层破裂面通过 17 号、18 号闸部位，上盘（1~16 号闸及左岸排洪闸）抬升约 9.8m，下盘（17、18 号闸与右岸重力坝）受地层挤压也抬升 2.1m，两侧形成 7.7m 的高差，16~18 号闸遭到严重破坏（图 1.4）。其余各孔虽经受抬升 9.8m 的剧烈振动，但震害相对较轻（图 1.5）。此外，右岸排沙闸闸墩产生水平剪切裂缝，若干孔闸墩在弧形门轴承处、靠近溢洪道顶部出现裂缝，溢洪道堰顶出现碎裂，若干孔闸墩顶部工作桥发生碰撞出现破损，震后除右岸遭破坏的 16~18 号孔用围堰隔断外，其余各孔经过闸基固结灌浆处理，墩体裂缝采用环氧树脂或水泥砂浆填补，工程已恢复部分供水与取水能力。



图 1.4 石冈坝由于断层错动破坏的闸孔

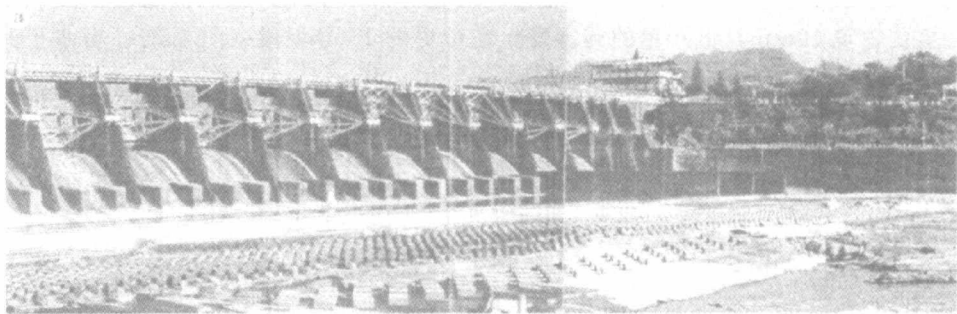


图 1.5 石冈坝其余各震害相对较轻的闸孔

1.2 混凝土拱坝震害

历史上高拱坝遭遇强地震的实例很少，真正遭受地震损伤破坏的高拱坝更属少见。拱坝中实际遭遇地震和震害最严重的一座是美国的 Pacoima 拱坝^[2]。该坝位于美国加州，坝高 113m，为等中心角双曲拱坝。坝址河谷狭窄，主要由片麻石英闪长岩构成，岩体节理和剪切带发育。在 1971 年的 San Fernando 地震（6.6 级）中受到了极强烈的震动。左坝



肩距离坝顶 15m 处测得水平向 $1.25g$ 、竖向 $0.7g$ 的最大加速度记录。地震造成左坝肩下游处的岩体错动多达 20cm，左岸重力墩与坝块间横缝张开了 1cm、深 14m。事后为提高左岸坝肩岩体稳定性进行了补强处理，打设了 35 根后张式锚索。1994 年再次遭遇 6.8 级的 Northridge 强震，坝体损伤比 1971 年更为严重。左岸支墩岩体错动 47cm，左岸邻近坝肩的一条构造横缝产生了约 5cm 的残余张开量（图 1.6）。

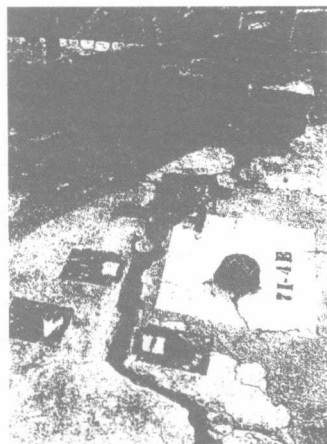


图 1.6 Pacoima 拱坝

中国台湾地区的谷关拱坝^[3]（图 1.7），高 85.1m，校核设计地震加速度为 $0.12g$ 。经历了 1999 年的集集地震（7.6 级）。地震后在右岸坝顶距右拱端约 2.5m 处发现一条裂缝，垂直穿越坝顶路面，在距胸墙约 5cm 处停止，该裂缝往坝体下游面延伸，在下游坝面形成长约 25m 的斜裂缝，最大宽度约 12mm，此外还观察到一些较短的斜裂缝。

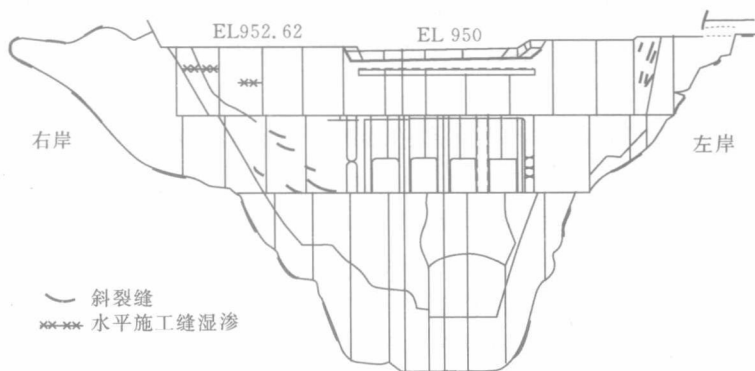


图 1.7 集地震后的谷关拱坝（下游立视）



图 1.8 汶川地震后的沙牌拱坝

沙牌拱坝（图 1.8）位于四川省汶川县境内，于 2001 年建成，坝高 132m，为三心圆拱的碾压混凝土重力坝。坝址河谷狭窄，坝基为花岗岩和花岗岩闪长石，岩体完整性较好。在 2008 年 5 月 12 日发生的里氏 8.0 级汶川特大地震中，距离震中 36km，处于Ⅸ度地震烈度区，库水位接近正常蓄水位。震后震害调查表明，虽然因山体滑坡导致引水钢管跨河管桥波纹节破坏，地面发电厂房受损严重，但坝体结构整体完好，右岸横缝上部有张开迹象，但顶部未见裂缝；左、右

岸坝顶上部局部坡面表层岩体破碎及覆盖层滑塌、掉块，临近坝肩抗力体及库岸经锚固的边坡整体稳定。



1.3 混凝土坝地震非线性响应计算方法

传统的混凝土坝静动力分析采用线弹性方法,对大坝的安全评价采用以混凝土单轴抗拉强度为标准的强度准则。但是随着结构抗震设计技术的发展,同时经过多年实践,研究者和设计者们认识到弹性动力分析给出的峰值应力不能提供足够的信息以判断不同地震动所引起震害的严重性和对大坝安全的影响。尽量真实地反映大坝在进入非线性后的行为,研究大坝在强震中的破坏形态,是当今混凝土坝动力分析的重要课题。此外,混凝土坝抗震安全的影响因素很多,包括混凝土材料非线性、无限地基辐射阻尼、拱坝的横缝张合等。大坝的数值模拟必须全面考虑这些因素,才能更真实地模拟其在强震下的状态。

1.3.1 混凝土非线性计算模型

混凝土是由水泥、粗细骨料和水等物质拌和后养护形成的人工复合材料,力学性质极其复杂。为了合理地模拟混凝土结构的力学行为,从混凝土材料的角度研究其力学性能是非常必要的。国内外研究机构及学者非常重视对混凝土材料特性的研究,从物理试验和数值模拟两方面做了大量的工作。混凝土材料具有以下特点^[4]。

- (1) 非均质、不等向材料。
- (2) 由于成型和养护过程中一些因素的影响,具有复杂的微观内应力、变形和裂缝状态。
- (3) 变形的多元组成,包括骨料的弹性变形、水泥凝胶体的黏性流动、微裂缝的形成和扩展。
- (4) 环境因素对强度和变形产生影响。
- (5) 应变速率相关性^[5-10],即混凝土材料特性与时间相关。
- (6) 拉压不等性,即抗压强度远远高于抗拉强度。
- (7) 损伤敏感性^[11]。
- (8) 在循环荷载下,受到损伤时会产生残余应变^[12](图1.9)。

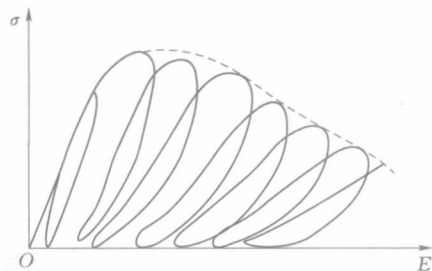


图1.9 循环加、卸载实验的应力-应变曲线

(9) 应变软化特性,应力-应变关系在超过峰值强度后呈下降趋势。

(10) 分形特性,混凝土结构面与断裂面是凹凸不平 and 极不规则的,它既不是二维平面,也不是三维空间曲面,而是分数维 D_T 的不规则空间。

在外荷载或环境变化的条件下,混凝土中的微缺陷将在荷载、温度或环境效应等因素持续作用下产生弥散裂隙,经进一步生长、扩展,逐渐合并、聚集,形成一定尺度的宏观裂纹,从而导致结构的强度和刚度下降,以致最终发生破坏。假如将混凝土的寿命划分为两个阶段,那么微缺陷的生长和汇合并发展成为具有一定宽度的宏观裂纹可称为第一阶段;而宏观裂纹扩展并导致混凝土的最终破坏称为第



二阶段。

对混凝土结构来说,第一阶段所经历的时间可占到其寿命的80%左右。处于第一阶段的混凝土可以看作是连续介质。混凝土处于弹性范围或者接近弹性范围时,连续介质力学方法可以很好地描述其弹性响应。目前处理连续介质问题的数值方法主要有有限差分法、有限元法以及边界元法等。其中,有限差分法以Taylor级数展开等方法,把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。该方法数学概念直观、表达简单,不足之处在于离散方程的守恒特性难以保证,更重要的是对不规则区域边界条件的适用性差。有限元法基于变分原理和加权余量法,把计算域进行离散后,划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,借助变分原理或加权余量法将微分方程离散求解。有限元法由于其便于处理复杂边界条件、分析复杂结构、模拟复杂材料属性以及便于编制通用计算程序等优点,在混凝土材料与结构的变形分析和稳定分析中获得了广泛的应用。

在第一阶段中,若混凝土的损伤情况比较严重,进入到明显的非线性阶段,则必须采用能够描述混凝土微裂纹或非线性的模型。学者们基于有限元法发展了多种弹塑性模型^[13]和损伤力学模型。

塑性力学起源于对金属的研究,引入混凝土材料的非线性研究后,根据混凝土的特点建立了不少各向同性破坏准则,如Mohr-Coulomb准则、Drucker-Prager准则和专门应用于混凝土的Ottosen四参数准则、Hsieh-Ting-Chen四参数准则、William-Warnke三参数和五参数准则以及Bresler-Pister准则等。该理论可描述混凝土力学特性中的非线性行为,描述混凝土非线性中的塑性不可逆应变,可考虑一定程度的刚度强化或退化,采用单轴或多轴破坏准则,并可采用关联或非关联流动法则表达塑性应变演化。但对混凝土来说,首先是破坏的微观现象与金属不同,再则虽然混凝土的应力-应变曲线与典型弹塑性材料相似,但混凝土材料破坏时表现出来的体积改变以及拉压不等性都是塑性力学理论难以解释的。

损伤力学对于作为连续介质的混凝土来说是合适的。混凝土的初始微缺陷在外载作用下不断扩展和合并,形成宏观裂纹。宏观裂纹继续扩展,导致混凝土最终破坏。这些导致材料和结构力学性能裂化的微观结构的变化就是损伤。Dougill^[14]将损伤理论引入混凝土领域的工作,开辟了混凝土损伤研究的先河。采用连续损伤的概念描述材料力学特性的弱化,并用损伤指标来表征材料刚度劣化和强度降低的程度,模拟其非线性行为。进而采用宏观平均的办法,将材料劣化简化为其力学性能包括强度和模量的降低,从而材料或结构的响应也随之得到修正。通过力学性能的不断劣化,可描述混凝土结构的渐进破坏。损伤力学模型的缺点是难以模拟混凝土裂缝产生和发展的过程。

混凝土宏观裂纹出现以后,连续介质力学方法不再适用,应采用非连续介质力学方法。断裂力学模型在混凝土中的应用比较多,主要包括弥散型裂缝模型和离散型裂缝模型。断裂力学的研究对象是含有裂缝缺陷的固体材料,对其进行断裂分析,研究断裂条件和裂缝的扩展规律。经典断裂要求研究对象切口敏感,还要求材料具有初始宏观裂纹或者



一条或几条主导裂纹,裂纹前缘应有尖锐的裂尖,应力强度因子超过临界状态后迅速失稳扩展。但混凝土内裂纹尖端存在一个微裂纹区,大量微裂缝无法通过断裂力学来描述,且裂纹扩展受到骨料阻挡可能改变扩展方向。另外,混凝土中主裂缝的钝化效应和尺寸效应等也是断裂力学方法面临的难题。此外,断裂力学方法往往实现复杂,计算量比较大。这些因素都阻碍了断裂力学模型在混凝土坝地震响应分析中的应用。

对于非连续介质的模拟,尤其是采用数值方法进行模拟是近年来才兴起的研究工作,在岩土工程中比较多见。因为岩体是典型的非连续介质,其中充满各种不连续的缺陷,包括节理、裂隙、褶皱、接触带和剪切带等。对混凝土来说,宏观裂纹出现以前是连续介质,但在宏观裂纹出现以后也具有了非连续介质的特征。模拟非连续介质力学的方法中,以离散单元法(Discrete Element Model, DEM)和非连续变形分析方法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)比较有效,但也各有一定的局限性。在离散单元法中,以软弱结构面切割成的离散块体为基本分析单元,对块体逐个进行受力分析,在块体间的接触约束下运用牛顿第二运动定律描述各块体的运动过程。目前,二维离散元法比较成熟并有不少成功的应用,且已开发了相应的商业软件。三维方法由于接触判断的复杂性而发展稍慢。此外,离散元法在能量耗散机制、时间步的选取等方面还存在着一些不易改进的问题。刘凯欣等^[15]利用该方法,对冲击荷载下混凝土平板的变形、破坏全过程进行了数值模拟和动画显示;孟茁超等^[16]利用三节点三角形离散单元对地震荷载作用下混凝土重力坝的动力响应进行了模拟;张楚汉、侯艳丽等^[17,18]采用三维离散元法对拱坝-地基系统的安全性进行了研究并得到了一些有益的结论。其中包括对梅花拱坝蓄水后溃决破坏的模拟分析、对拱坝-坝肩系统整体抗滑稳定性进行的超载模拟分析和强度折减分析。非连续变形分析方法依循离散元法的基本思想,以节理界面切割岩体形成块体单元,以块体位移和应变为未知量,通过块体间接触和几何约束形成求解系统。非连续变形分析方法^[19]平行于有限元法和离散单元法,把静力、动力和正分析、反分析统一起来,具有完备的块体运动学理论及其数值实现、全一阶位移近似、严格的平衡假定、正确的能量耗散过程和较高的计算效率。王建全等^[20]对一个坝基被节理面切割的重力坝以及一个受到地震作用且坝体被裂缝面切割的重力坝分别进行了静、动力分析,取得了较好的效果。张国新等^[21]利用二维 DDA 方法分析了重力坝的抗滑稳定性;刘君等^[22]将 DDA 与有限元法耦合研究了碾压混凝土重力坝的动力响应。离散单元法和非连续变形分析方法都要对裂纹面的扩展部位和方向事先有所估计或了解,对裂纹扩展方向未知的混凝土开裂问题也无能为力。不同的裂缝扩展方向的假定,可能带来不同的计算结果。

总的说来,为了描述混凝土从连续介质→产生微裂纹→出现宏观裂缝→破坏的全过程,需要针对不同的阶段采用不同的模型。这在数值实现中是非常复杂的。目前尚没有一种理想的单一的数值模型可模拟混凝土从连续到非连续的全过程。

1.3.2 混凝土坝地震非线性计算模型

近年来,上述模型应用于混凝土坝地震损伤破坏的数值分析有了较大的发展,上述混凝土非线性模型都有应用,且以损伤力学模拟居多^{[26]~[28]}。但比较多的文献仍然偏重于二维重力坝的地震响应分析^{[29]、[30]}。



损伤力学模型方面, 早期 Cervera 等^[31]将损伤力学概念运用于混凝土大坝, 建立了各向同性损伤模型, 研究了重力坝和拱坝在地震作用下的损伤破坏情况。Valliappan 等^[32]采用有限元-边界元耦合方法研究了 Koyna 大坝在地震激励下的损伤发展。Yusuf Calayir 等^[33]采用损伤力学方法, 假定损伤为二阶张量的形式, 并考虑应变软化, 研究了损伤对 Koyna 大坝地震响应的影响。邱战洪等^[34]考虑了坝基脆性引起的动力损伤, 分析了大坝上游迎水面、坝踵、坝趾附近基岩内的损伤分布。陈健云等^[35]建立了应变率相关的混凝土非线性损伤模型, 对一混凝土重力坝进行了地震响应分析。杜荣强等^[36]应用损伤力学模型分析了三峡大坝在地震荷载作用下的损伤分布。沈怀至等^[37]在线弹性动力分析与弹塑性损伤力学分析基础上, 讨论了 6 条地震波作用下 Koyna 重力坝的损伤分布, 初步建立了一个重力坝地震破坏评价模型。段红霞等^[38]采用混凝土塑性损伤本构理论, 考虑应变速率变化以及材料损伤引起的刚度退化, 对丰满重力坝进行了地震损伤模拟。

在断裂力学模型方面, Skrikerud 等^[39]在 1986 年结合强度准则, 用分离式裂缝模型模拟了裂缝的产生、发展和反复张合的行为, 并对 Koyna 重力坝进行了动力开裂响应分析。Ayari 等^[40]采用分离式裂缝模型研究了动力荷载作用下重力坝的裂缝扩展过程。Vargas - loli 等^[41]在模拟混凝土重力坝的地震开裂时, 假定弥散裂缝模型软化曲线中的软化段为垂直下降的形式, 并在此基础上分析了大坝与库水相互作用的影响。王光纶等^[42]采用固定裂缝模型, 通过裂尖的网格重剖分使得裂纹平行于单元最大主应力方向, 模拟了 Koyna 大坝裂纹的扩展过程。Mirzabozorg 等^[43]采用弥散裂缝模型对三维重力坝在地震作用下考虑库水坝体相互作用的开裂行为进行了分析, 获得了裂缝在坝体内的发展情况。

在三维拱坝方面比较有代表性的是 Valliappan 等^[44]应用弹性损伤模型研究了刚性地基上拱坝的地震损伤范围, Lotfi 等^[45]应用弥散性裂缝模型研究了刚性地基上拱坝的地震拉应力分布, 估计了可能的开裂范围。计算中单元出现非正交裂缝后, 对应力-应变关系进行调整, 同时引入界面单元, 可结合进行离散性裂缝的耦合分析。陈健云等^[46, 47]基于速率相关的损伤力学模型, 研究了拱坝的地震响应与可能的损伤区域, 杜荣强等^[48, 49]建立了反映多轴损伤破坏特性的各向异性弹塑性损伤模型进行拱坝地震响应分析。崔玉柱等^[50]用刚体弹簧元研究了梅花拱坝的破坏机理, 潘坚文等^[51]在拱坝的地震开裂分析中考虑了塑性耦合的影响。潘坚文研究的特点是网格分得比较细, 考虑了横缝张合的影响, 研究了配筋对损伤开裂的影响, 地基采用无质量地基模型。总的看来, 三维拱坝的地震损伤分析受到研究者越来越广泛的重视, 但由于问题的复杂性, 大多引入了一些比较简化的假定。例如, 多轴损伤开裂只能近似考虑, 弹塑性耦合中有的采用了理想塑性, 有的采用了过度简化的塑性屈服面, 对无限地基的影响一般都作了简化。因此, 计算结果都存在较大的局限性。上述计算一般只能估计拱坝的地震损伤范围, 难以进行损伤发展进程的数值模拟, 而且还会存在计算的稳定性和收敛性等问题。

参 考 文 献

- [1] 林皋. 混凝土大坝抗震安全评价的发展趋向 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26 (1): 1-12.
- [2] Hall J F. The dynamic and earthquake behavior of concrete dams; review of experimental behavior and ob-



- servational evidence [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1988, 7 (2): 58-121.
- [3] 朱伯芳. 1999 年台湾 921 集集大地震中的水利水电工程 [J]. *水力发电学报*, 2003 (1): 21-33.
- [4] 过镇海. 钢筋混凝土原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 林皋, 陈健云. 混凝土大坝的抗震安全评价 [J]. *水利学报*, 2001, (2): 8-15.
- [6] 肖诗云, 林皋, 王哲, 等. 应变率对混凝土抗拉特性影响 [J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41 (6): 721-725.
- [7] 肖诗云, 林皋, 逯静洲, 等. 应变率对混凝土抗压特性的影响 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2002, 35 (5): 35-39.
- [8] 闫东明, 林皋, 王哲, 等. 不同应变速率下混凝土直接拉伸试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2005, 38 (6): 97-103.
- [9] 闫东明, 林皋, 王哲, 等. 不同环境下混凝土动态直接拉伸特性研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2005, 45 (3): 416-421.
- [10] 闫东明, 林皋. 混凝土动态性能试验研究现状及展望 [J]. *水科学与工程学报*, 2006, (4): 1-6.
- [11] 林皋, 刘军, 胡志强. 混凝土损伤类本构关系研究现状与进展 [J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50 (6): 1055-1064.
- [12] Lü P Y, Li Q B, Song Y P. Damage constitutive of concrete under uniaxial alternate tension-compression fatigue loading based on double bounding surfaces [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 3153-3166.
- [13] 王哲, 林皋. 混凝土的一种非相关流塑性本构模型 [J]. *水利学报*, 2000, (4): 8-13.
- [14] Dougill J W, Lau J C, Burt N J. Toward a theoretical model for progressive failure and softening in rock, concrete and similar materials [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE-EMD, 1976: 335-355.
- [15] 刘凯欣, 高凌天, 郑文刚. 混凝土动态破坏过程的数值模拟 [J]. *工程力学 (增刊)*, 2000, 470-474.
- [16] 孟茁超, 蔡松柏. 用新离散单元法分析混凝土重力坝的地震响应 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2006, 4 (3): 39-42.
- [17] 侯艳丽, 张冲, 张楚汉, 等. 拱坝沿建基面上滑溃决的可变形离散元仿真 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27 (6): 657-661.
- [18] 张冲, 侯艳丽, 金峰, 等. 拱坝一坝肩三维可变形离散元整体稳定分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25 (6): 1226-1232.
- [19] Shi G H, Goodman R E. Two-dimensional discontinuous deformation analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1985, 9 (6): 541-556.
- [20] 王建全. 三维块体系统接触检索算法与非连续变形分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [21] 张国新, 金峰. 重力坝抗滑稳定分析中 DDA 与有限元方法的比较 [J]. *水力发电学报*, 2004, (1): 10-14.
- [22] 刘君, 陈健云, 孙宪京, 林皋. 基于 DDA 和 FEM 耦合方法的碾压混凝土坝抗震安全性分析 [J]. *大连理工大学学报*, 2003, (06): 793-798.
- [23] Lee J, Fenves G L. A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27 (4): 937-956.
- [24] 肖诗云, 林皋, 李宏男. 拱坝非线性地震反应分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22 (4): 36-40.
- [25] 林皋, 陈健云, 肖诗云. 混凝土的动力特性与拱坝的非线性地震响应 [J]. *水利学报*, 2003, (6): 30-36.
- [26] 闫晓荣, 林皋. 基于混凝土应力-应变关系的正交各向异性损伤模型及其应用 [J]. *水科学与工程*