
高混凝土坝 水下爆炸分析 理论与方法

THEORY AND METHOD OF HIGH CONCRETE DAMS
SUBJECTED TO UNDERWATER EXPLOSION

张社荣 王高辉 王超 著



科学出版社

高混凝土坝水下爆炸 分析理论与方法

Theory and Method of High Concrete Dams Subjected to
Underwater Explosion

张社荣 王高辉 王超 著

国家自然科学基金资助（编号：51379141、51509189）

科学出版社

北京

内 容 简 介

突发爆炸荷载下的高混凝土坝抗爆安全评价问题,是关系我国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容,也是我国水利工程建设中必须面对的前沿性关键技术和重要战略课题。本书主要研究了在揭示水下爆炸冲击荷载下高混凝土坝损伤机理中遇到亟待解决的关键问题和技术难题,对水下爆炸冲击荷载作用下高混凝土坝抗爆性能评价理论与方法进行了系统、全面的研究,涉及高应变率下的动态损伤本构模型、炸药的起爆过程、冲击波传播特性及边界效应、多介质瞬态动力耦合相互作用、大型数值仿真模拟的精细建模与高效数值计算方法以及大坝非线性爆炸反应分析理论与方法等内容。

本书可为工程结构抗爆防护设计提供理论基础,也可供为从事结构抗爆相关工作的研究人员和研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高混凝土坝水下爆炸分析理论与方法 / 张社荣, 王高辉, 王超著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-047844-3

I. ①高… II. ①张… ②王… ③王… III. ①混凝土坝—水下爆炸—研究 IV. ①TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 056268 号

责任编辑: 任加林 王杰琼 / 责任校对: 马英菊
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 226 800

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着精确制导武器的快速发展以及国内外恐怖袭击和意外爆炸事件不断发生，对重大水工建筑物的结构安全构成了巨大的威胁。在结构工程防护领域，结构抗爆研究已日益引起人们的注意，重要经济、军事及民用设施等战略目标的抗爆设防给工程界和学术界提出了迫切的要求和挑战。

为了满足对绿色能源越来越大的需求，一大批 100~300m 级的高坝建设进入快速发展阶段。在一般状态下，大坝正常安全运行可以得到保障。然而高坝由于其显著的政治经济效益，无疑成为局部战争和恐怖爆炸袭击的重点攻击对象，大坝一旦失事，不仅使工程本身遭受巨大的损失，而且可能导致更为严重的次生灾害，也使得流域梯级水库群的安全问题更加突出，一旦梯级水电站的某个工程失事，引起的连锁反应后果将不堪设想。因此，对突发极端荷载作用下的大坝动态响应行为和损伤机理进行研究，评估大坝遭受突发极端荷载作用后的生命力，是关系我国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容，也是我国水利工程建设中必须面对的前沿性关键技术和重要战略课题。

高坝作为重要的生命线工程，进行抗爆设计具有重要的意义，而我国在水工大坝应对突发性爆炸事件的抗爆防护设计方面的研究起步较晚，基础薄弱，因此为了有效减轻突发性爆炸造成的结构破坏及溃坝造成的次生灾害，需对高坝在爆炸荷载作用下的动力响应和破坏效应进行分析和研究，同时需将研究的成果结合到水工结构的爆炸防护设计中，最大程度地减少高坝因突发性爆炸所造成的损失。

本书主要研究了在揭示水下爆炸冲击荷载下高混凝土坝损伤机理中遇到亟待解决的关键问题和技术难题，对水下爆炸冲击荷载作用下高混凝土坝抗爆性能评价问题进行了系统、全面的研究。主要研究了炸药在不同介质的爆炸过程、近边界面的冲击波传播特性及气穴效应、冲击波与结构的动态相互作用；水下爆炸冲击波传播的网格尺寸确定方法；水下和空中爆炸冲击下的混凝土重力坝毁伤特性；水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的破坏效应、抗爆性能及损伤预测模型；基于 SPH-FEM 耦合的接触爆炸破坏效应；水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝、重力拱坝、拱坝等重大水工建筑物的毁伤效应等。

本书共分为八章。第一章为绪论，主要介绍了高坝面临的抗爆安全问题，高坝抗爆性能评价的理论和方法，列举了目前国内外在此方面做的工作。第二章着重介绍了爆炸动力学问题，包括炸药爆炸的爆轰理论，炸药在水下、空中和固体介质中的起爆过程和爆炸现象，炸药、水和空气的材料模型和状态方程。第三章研究了大坝-库水-地基系统的动态耦合算法，提出爆炸冲击波精确数值模拟的网

格尺寸确定方法,对比水下和空中爆炸冲击波的传播特性。第四章建立水下爆炸气穴模型,研究了自由面、结构面背水和结构面背空气等边界条件对水下爆炸冲击波传播特性的影响,探讨冲击波在不同介质中的透射和反射机理。第五章研究水下和空中爆炸冲击波对大坝动态响应行为、损伤程度、毁伤机理及抗爆性能的影响,分析坝体—地基—库水之间的动力相互耦合作用机理,提出适应大规模和高度非线性问题的计算方法。第六章研究水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝的破坏效应和抗爆性能,建立了混凝土重力坝的损伤破坏等级分类,提出水下爆炸冲击下混凝土重力坝损伤预测模型。第七章给出了 SPH-FEM 耦合算法,并基于该算法研究了水下接触爆炸下的混凝土重力坝破坏效应。第八章就水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝、混凝土重力拱坝、混凝土拱坝等高混凝土坝的破坏效应进行相关研究,给出了不同混凝土坝的抗爆性能特点。书中还列举了大量的参考文献,可供读者全面深入了解相关理论和方法。

感谢崔激副教授、王超讲师对本书写作过程中的帮助和支持;感谢课题组孔源、李宏璧、于茂、冀天竹等研究生对本书提供的相关材料;感谢吕杨、王子成、陈王、张超等研究生在文字与图形处理中给予的大力帮助。

由于水平有限,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。

张社荣

2015年8月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 高坝面临的抗爆安全问题	1
1.2 高坝抗爆试验研究现状	3
1.3 高坝抗爆性能评价理论与方法	7
1.3.1 高坝抗爆性能评价	7
1.3.2 高应变率下的混凝土动态损伤本构模型	10
1.3.3 多介质动态耦合作用及高效数值计算方法	12
第二章 爆炸动力学基本理论	13
2.1 炸药的爆炸反应	13
2.2 炸药在不同介质中的爆炸过程及基本现象	16
2.2.1 水下爆炸	16
2.2.2 空中爆炸	20
2.2.3 固体介质中爆炸	23
2.3 材料模型及状态方程	26
2.3.1 炮轰产物的材料模型及状态方程	26
2.3.2 水的材料模型及状态方程	27
2.3.3 气体的材料模型及状态方程	27
第三章 爆炸冲击波传播及多介质动态耦合算法	28
3.1 爆炸冲击波传播经验公式	29
3.1.1 水下爆炸	29
3.1.2 空中爆炸	31
3.2 大坝—库水（空气）—地基系统的动态耦合算法	32
3.2.1 Lagrangian 方法	32
3.2.2 Eulerian 方法	34
3.2.3 Coupled Eulerian-Lagrangian 方法	35
3.3 爆炸冲击波精确数值模拟的网格尺寸确定方法	37
3.3.1 网格尺寸确定方法的提出	38

3.3.2	网格尺寸确定及其验证	40
3.3.3	误差分析	42
3.4	水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析	45
第四章	近边界面的水下爆炸冲击波传播特性及气穴效应	50
4.1	近边界面的气穴问题	50
4.1.1	气穴现象及气穴模型	51
4.1.2	气穴模型验证	55
4.2	自由场水下爆炸冲击波传播特性	56
4.3	近界面冲击波传播特性及边界效应	58
4.3.1	近自由面水下爆炸	59
4.3.2	近结构面(背空气)水下爆炸	62
4.3.3	近结构面(背水)水下爆炸	66
第五章	水下和空中爆炸下混凝土重力坝的毁伤特性	70
5.1	RHT 混凝土动力损伤本构模型	70
5.1.1	失效面	70
5.1.2	弹性极限面及应变硬化	72
5.1.3	残余失效面	73
5.1.4	损伤演化	73
5.1.5	状态方程	73
5.2	JH-2 岩基动力损伤本构模型	74
5.3	耦合模型验证	77
5.3.1	试验模型描述	77
5.3.2	数值模型建立	78
5.3.3	数值与试验结果比较分析	79
5.4	水下和空中爆炸冲击波传播的三维数值模拟	81
5.5	水下和空中爆炸冲击下混凝土重力坝的动态响应和毁伤特性	85
5.5.1	水下和空中爆炸的混凝土重力坝全耦合模型	85
5.5.2	水下和空中爆炸冲击下的混凝土重力坝动态响应行为	87
5.5.3	水下和空中爆炸冲击下的混凝土重力坝毁伤特性	93
5.5.4	重力坝水下爆炸网格尺寸效应分析	95
第六章	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的损伤预测	98
6.1	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的破坏效应	98
6.1.1	混凝土重力坝模型描述及数值模型建立	98

6.1.2	冲击波在水下和大坝结构中的传播特性	100
6.1.3	水下爆炸冲击荷载下的大坝动态响应和破坏效应	104
6.2	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的抗爆性能	107
6.2.1	起爆距离对大坝抗爆性能的影响	108
6.2.2	炸药量对大坝抗爆性能的影响	110
6.2.3	起爆深度对大坝抗爆性能的影响	112
6.2.4	库前水位对大坝抗爆性能的影响	114
6.3	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的损伤预测	118
6.3.1	基于形态的混凝土重力坝爆炸损伤破坏等级分类	118
6.3.2	关键损伤因素确定	119
6.3.3	水下爆炸冲击下的大坝损伤预测模型建立	121
第七章	基于 SPH-FEM 耦合的混凝土重力坝接触爆炸破坏效应	124
7.1	问题的提出及研究现状	124
7.2	SPH 方法基本理论	125
7.2.1	SPH 方法基本方程	125
7.2.2	光滑核函数	128
7.2.3	基于 SPH 方法的爆轰控制方程	128
7.3	SPH-FEM 耦合算法	130
7.3.1	SPH-FEM 固连耦合算法	131
7.3.2	SPH-FEM 接触耦合算法	133
7.4	SPH-FEM 耦合模型验证	134
7.5	水下接触爆炸下的混凝土重力坝破坏效应分析	136
7.5.1	基于 SPH-FEM 耦合的重力坝水下接触爆炸模型	136
7.5.2	水下接触爆炸下混凝土重力坝毁伤特性	137
第八章	爆炸冲击荷载下高混凝土坝的破坏效应分析	142
8.1	高应变率下的非线性动态本构模型	142
8.1.1	HJC 混凝土动态损伤本构模型	142
8.1.2	坝基岩体非线性动态本构模型	145
8.2	Arbitrary Lagrange-Eulerian 方法	145
8.3	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力坝的破坏效应	148
8.3.1	大坝受袭的可能爆炸方式	148
8.3.2	水下爆炸冲击荷载下的混凝土重力坝抗爆性能	149
8.3.3	侵彻爆炸冲击荷载作用下的大坝抗爆性能	156
8.3.4	空中爆炸冲击荷载作用下的大坝抗爆特性	159

8.4	水下爆炸冲击荷载下高混凝土拱坝的破坏效应	161
8.4.1	高混凝土拱坝的水下爆炸全耦合模型建立	162
8.4.2	水下爆炸冲击荷载下的高拱坝抗爆性能	163
8.4.3	大当量炸药水下爆炸冲击下的高拱坝抗爆性能	165
8.5	水下爆炸冲击荷载下混凝土重力拱坝的破坏效应	167
8.5.1	水下爆炸混凝土重力拱坝的全耦合模型建立	167
8.5.2	拱冠梁处水下爆炸冲击下重力拱坝破坏模式分析	168
8.5.3	坝肩处水下爆炸冲击下重力拱坝破坏模式分析	170
	参考文献	173

第一章 绪 论

1.1 高坝面临的抗爆安全问题

随着国民经济和坝工技术的发展,为了满足对绿色能源越来越大的需求,一系列 100~300m 世界级的高混凝土坝正在或即将在我国西部地区建设,如表 1-1 所示高坝工程。这些混凝土坝不论是在大坝高度还是在规模上都达到世界最高水平,且地质条件复杂,环境条件恶劣。在突发爆炸荷载下,大坝一旦失事,不仅使工程本身遭受巨大的损失,而且可能导致更为严重的次生灾害。流域梯级水库群的安全问题更加突出,一旦梯级水电站的某个工程失事,引起的连锁反应后果将不堪设想。然而,现行规范对大坝总强度设计时,一般只考虑包括静水、自重、泥沙压力、扬压力、地震荷载等通常性外荷载,没有考虑爆炸产生的极端外荷载。目前对重大水工结构物在爆炸荷载下的破坏机理及破坏过程研究尚显不足,更缺乏能支持工程设计理论和方法的科学和技术储备。因此对突发爆炸荷载作用下的大坝动态响应行为和损伤机理进行研究,评估大坝遭受突发爆炸荷载作用后的生命力,是关系我国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容,也是我国水利工程建设中必须面对的前沿性关键技术问题和重要战略课题。

表 1-1 我国部分已建、正在或即将建设的 100~300m 级高混凝土坝

混凝土重力坝	最大坝高 /m	PGA /g	建坝河流	混凝土拱坝	最大坝高 /m	PGA /g	建坝河流
龙滩	216.5	0.20	红水河	锦屏一级	305	0.197	雅砻江
黄登	203	0.251	澜沧江	小湾	292	0.308	澜沧江
官地	168	0.284	雅砻江	白鹤滩	289	0.325	金沙江
金安桥	160	0.399	金沙江	溪洛渡	285.5	0.321	金沙江
阿海	138	0.344	金沙江	龙盘	276	0.408	金沙江
喀腊塑克	121.5	0.21	额尔齐斯河	拉西瓦	250	0.230	黄河
龙开口	119	0.394	金沙江	大岗山	210	0.5575	大渡河

近年来,国际环境和形势不断恶化,恐怖爆炸袭击和事故型偶然爆炸事件不断发生,如 2001 年的“9·11”事件、2004 年的乌兹别克斯坦炸弹袭击事件、2010 年的巴克桑水电站爆炸事件、2010 年的莫斯科地铁爆炸事件等。纵观世界发展格局,发生全球性的战争可能性较小,但局部战争时有发生。且随着国际一体化的推进,我国受国际恐怖组织的爆炸袭击可能性增大,严重威胁着人们的生命

和财产安全,对我国经济发展和社会稳定构成了很大的威胁,在结构工程防护领域,结构抗爆防爆研究得到了世界范围内的普遍关注,重要经济军事及民用设施等战略目标的抗爆设防给工程界和学术界提出了迫切的要求和挑战。

重大水工建筑物由于其显著的政治经济效益无疑成为局部战争和恐怖袭击的重点攻击对象。近年来发生的几场局部战争表明,空袭与反空袭已成为现代战争的主要作战方式,重要经济、军事、民用设施等战略目标成为空袭的重点。20世纪以来,世界范围内发生了多起针对打击大坝及其发电设施的爆炸袭击事件:

①在第二次世界大战中,英国空军于1943年用特制的5枚6t重炸弹对德国鲁尔(Ruhr)河支流上的敏尼坝(Mohne Dam)和埃德坝(Eder Dam)实施水中爆炸而造成溃坝^[1](图1-1),冲毁了下游水利工程、铁路、公路设施,淹死1200余人,德国遭受了重大损失;②在抗美援朝战争中(1952年),美军曾对水丰水电站进行了空袭,炸弹命中大坝下游面和电站厂房,并使厂房烧毁;③在朝鲜战争中(1953年),美军对朝鲜多个大型水库进行了大规模轰炸,溃坝后导致大量农田被淹没,下游公路铁路交通线被彻底损毁;④在越南战争中(1965年),美军同样采用大规模轰炸方式摧毁了越南北方的水坝堤岸系统,给北越造成了惨重损失;⑤在海湾战争中(1991年),以美国为首的多国部队38天内摧毁了伊拉克发电设施的25%,使全国电力供应减少50%,大中城市供电、供水、排水、通信等系统被摧毁;⑥科索沃战争中(1999年),北约在78天的空袭中轰炸了南联盟的1900个重要目标,破坏了14座发电站、63座桥梁等重要设施,致使南联盟全国100%的炼油能力和50%的动力系统被摧毁。大坝遭受的其他爆炸袭击事件如表1-2所示^[2]。



(a) 敏尼坝受袭溃坝图



(b) 埃德坝受袭溃坝图

图 1-1 德国敏尼坝和埃德坝被炸溃坝情况^[1]

表 1-2 大坝遭受的爆炸袭击事例

坝的英文名称	国家	坝型	坝高	破坏日期	破坏方
Ordunte	西班牙	重力	56	1937.7	佛朗哥军队

续表

坝的英文名称	国家	坝型	坝高	破坏日期	破坏方
S.Chiana	意大利	连拱	70	1941.3	英国
Dnieper (1)	乌克兰	重力	61	1941.9	苏联
Dnieper (2)	乌克兰	重力	61	1943.9	德国
Sorpe	德国	堰	27	1944.10	英国
Urft (1)	德国	重力	58	1944.12	美国
Urft (2)	德国	重力	58	1945.2	德国
Schwammenuael	德国	土石	52	1945.4	美国
Hwacheon	朝鲜	重力	81	1951.5	—
Chasan	朝鲜	土石	—	1953.5	—
Toksan	朝鲜	土石	—	1953.5	—
Rastan	叙利亚	堆石	67	1973.10	以色列
Calueque	安哥拉	土石	13	1988.6	内战
Peruca	克罗地亚	堆石	65	1993.1	塞族武装

目前, 水坝在军事攻防中占据越来越重要的地位, 现代军事家对水坝的影响非常关注, 坝工工程师在设计水坝时也不可忽视“空防”要求, 如美国自 1953 年起要求美国陆军工程兵团水道试验站需对爆炸荷载作用下的大坝动力响应、破坏准则及溃坝洪水对下游地区影响进行研究; 苏联早在 20 世纪 50 年代初就系统进行了水下爆炸对大坝破坏作用的试验研究; 法国则专门制订了大坝安全法, 规定对所有大型水库大坝均须作溃坝模型试验研究; 我国针对三峡工程, 成立了“三峡工程防空试验组”, 进行了水下爆炸、直接命中坝体爆炸、空中爆炸各种不同爆炸方式下的模拟试验。“9·11”事件给美国人民带来了一场悲痛的惨剧, 从此人们对大坝的安全防范态度发生了很大的改变, 美国对国家基础设施采取了更加严密的安全监控措施。美国能源部圣迪亚国家实验室的鲁迪·马特路斯^[3]认为, 大坝在发电、防洪、供水以及通航等方面发挥了重大作用, 是国家的重要基础资源, 易遭恐怖分子袭击, 失事后果极其严重。

由于失事后果严重, 突发极端荷载下的高混凝土坝安全及防护问题值得关注。因此, 将爆炸荷载作为一种极端荷载, 开展大坝在爆炸冲击荷载作用下的动力破坏机理和抗爆性能研究, 揭示大坝在爆炸荷载下的毁伤机理及特性, 评估大坝遭受爆炸荷载作用后的生命力, 并开展相应的防护措施研究, 使大坝无论在正常运行期还是战时或恐怖袭击时都能更好地发挥经济和军事效益, 对提高重大水工结构物的抗爆安全性具有重要的理论、工程经济及社会政治意义。

1.2 高坝抗爆试验研究现状

水下爆炸冲击荷载作用下的结构破坏是一个十分复杂的过程, 造成结构破坏

的作用荷载往往是多样的，它是一个涉及水边界影响和目标运动等复杂的爆炸动力学问题。

国内外对大坝抗爆试验开展了一定的研究工作。1940年，Barnes Wallis 首次对敏尼大坝进行了一系列的抗爆模型实验（模型缩尺比例为 1：15，如图 1-2 所示），

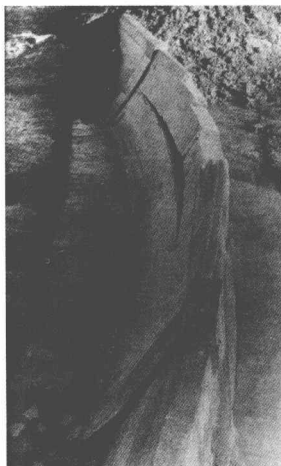
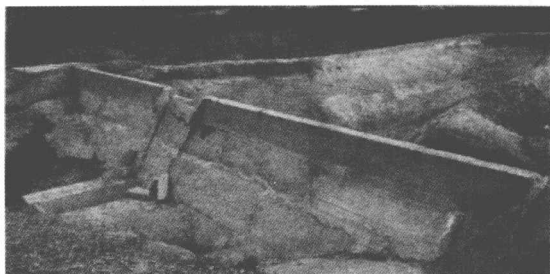


图 1-2 敏尼坝抗爆模型试验
(模型缩尺比例为 1：15)

同时采用模型试验和原型试验的方法对 Nant-y-Gro 坝进行了水下抗爆性能分析（图 1-3）；为了破坏德国大坝，Barnes Wallis 在 1942 年发明了绰号“跳弹”^[1]的一种圆桶形炸弹，该圆桶型炸弹在距水坝较远的地方以高速旋转投下，在水面上形成一个大水漂，可以避开防空炮网及水下的防鱼雷金属网，直奔大坝而去，其研究得到了炸弹在水下爆炸最大破坏效应时的最优起爆深度，并得到水下贴坝面爆炸下的大坝破坏模式（图 1-4）；美国曾在科罗里达州对一座高 24.4m 的实验水坝进行核效应实验，获得了不少珍贵的数据资料；1965 年以清华大学为主的课题组在广东新丰水电站，开展了水下爆炸相似规律的试验研究工作，爆炸试验先在试验池中进行，随后又在大坝上游 200m，水面下约 20m 处起爆了一个相当于 5kgTNT 当量的小药包，炸药起爆后水坝剧烈晃动，观测表明，

坝顶的晃动程度竟与一次 8 度地震烈度相当；1986~1988 年期间中国水利水电科学研究院（简称水科院）接受国防任务承担了水面爆炸的试验研究工作^[4]，在广西建造了水域面积 1800m²，最大水深 3.5m 的模型试验场，开展了国内首次不同爆炸条件下的水中冲击波特性和水工结构受力破坏试验研究。



(a) 模型试验



(b) 原型试验

图 1-3 Nant-y-Gro 坝抗爆试验

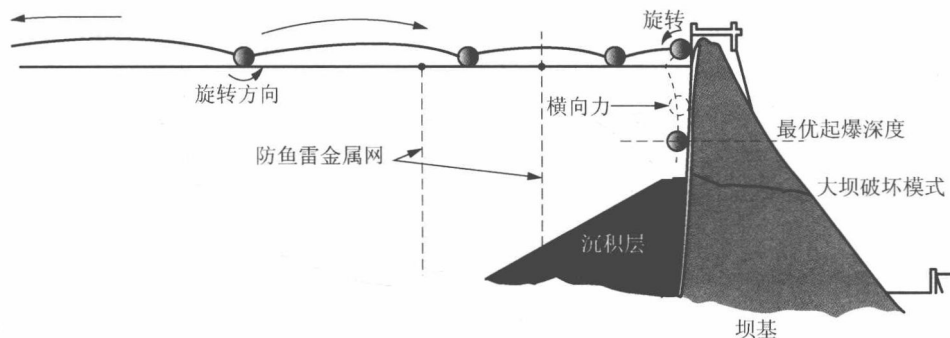


图 1-4 跳弹试验及水下爆炸最优起爆深度下的大坝破坏模式^[1]

2000 年, 霍永基^[5, 6]研究了不同类型爆破对各种水工结构大坝的荷载特性和破坏作用机制的影响, 对混凝土重力坝、拱坝工程的抗爆防护现状和实验研究结果作了综合分析探讨, 得到混凝土拱坝和混凝土重力坝典型破坏特征(图 1-5); 2010 年 Vanadit-Ellis 和 Davis^[7]采用离心机试验设计了水下爆炸冲击下的大坝动态响应, 并获得了水下爆炸冲击下的混凝土重力坝破坏模式(图 1-6); 2011 年张雪东等^[8]采用离心模拟爆破系统, 初步研究了不同水深, 距坝面不同距离情况下的雷管爆破对大坝的影响; 2011 年陆路等^[9]采用落锤冲击模拟了水下核爆的一次冲击波对混凝土重力坝的作用, 得到坝体的破坏模式主要包括贯穿性断裂、滑移, 碎裂、层裂和抛掷等。

我国针对三峡工程, 在相关部门成立“三峡工程防空试验组”, 在试验场做了一个较大的水库大坝模型, 进行了水下爆炸、直接命中坝体爆炸、空中爆炸等不同爆炸方式的模拟试验。通过试验研究, 提出了战时降低库水位、采取下游分洪措施、构筑防空潜坝、保留加强坝前施工围堰等工程防护措施。针对某一当量直接命中的破坏情况, 提出了抗直接命中的大体积混凝土坝方案和大体积堆石坝方案; 1964 年后, 我国工程兵科研三所和长江水利委员会(简称长江委)与水科院合作先后在试验场建造了 4 座混凝土试验坝, 包括蓄水、空库、空爆、地爆的各种效应试验, 研究不同爆炸方式下坝上荷载分布以及作用特性、坝体动力反应、坝体抗力分析及结构改进、核爆炸冲击波入水的传递与衰减, 这期间取得了一批重要的核效应试验资料, 对三峡工程人防问题以及类似工程的防护问题研究具有重大意义。由于现场核效应试验次数较少且耗费巨大, 使课题研究有一定的局限性, 为了补充必要的大量化爆模拟试验以及对水中爆炸时冲击波效应、坝体动力特性有更多的了解和研究, 1966~1980 年在试验站开展了混凝土重力坝空中及水中的直接命中、水下爆炸、浅水爆炸时坝上荷载分布计算及坝体抗爆性能分析等研究工作, 长江委与工程兵科研三所协作进行了“三峡大坝模型大激波管试验”, 水科院进行了“三峡大坝在激波峰值压力作用下的全息光弹试验”。

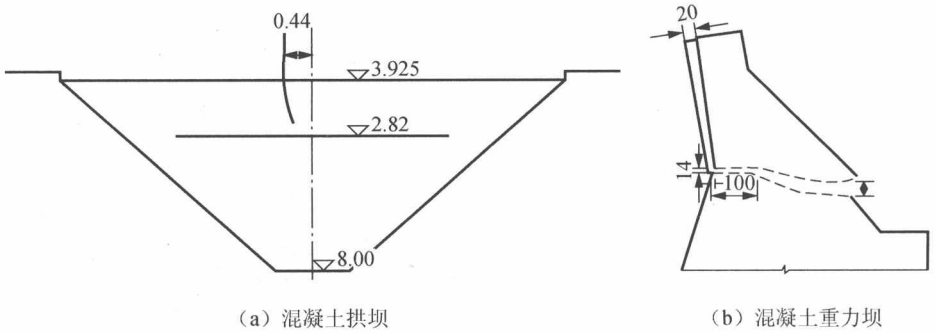


图 1-5 爆炸荷载下混凝土坝破坏模式特征 [5]

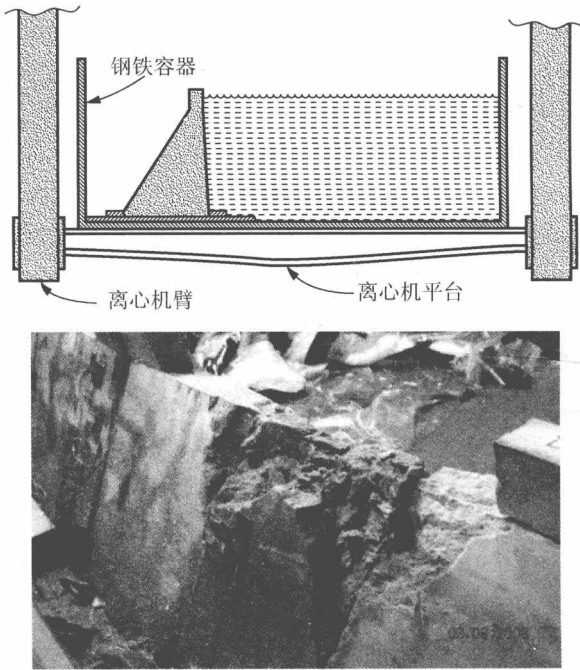


图 1-6 离心机试验下的混凝土坝破坏模式 [7]

1978 年，长江委在湖北陆水开始进行大型溃坝正态模型试验，同时进行三斗坪大型溃坝变态模型试验，其模型水平比尺 1/500，垂直比尺 1/125，从奉节到沙市以下 6km 处约 365km 河段，模型长 730 多 m。1978 年召开人防论证专家小组会议，专家们审阅了三斗坪大比尺溃坝变态模型试验研究报告，又到陆水现场观看了溃坝试验，一致认为：模型设计正确，精度较高、所得数据亦比较可靠，因该试验和研究报告与水科院早在 1958 年所做的小比尺大范围溃坝水工模型试验成果，十分接近。

然而开展爆炸冲击荷载作用下的大坝抗爆特性试验研究，由于试验条件、试

验经费的限制,且存在数据采集困难、数据误差、对环境造成影响等难以克服的弊端,国内外关于大坝遭受爆炸荷载作用的响应和破坏机制的试验研究资料尚少,试验数据资料有限。

1.3 高坝抗爆性能评价理论与方法

大坝受袭的可能方式主要有水下爆炸、直接命中坝体爆炸和空中爆炸^[10]三种爆炸方式。而各种爆炸方式中,水下爆炸问题最为复杂,涉及的关键技术及科学问题主要包括高应变率下的动态损伤本构模型及参数确定、冲击波的传播及多介质耦合、精细建模及高效数值计算方法,具有典型代表意义。

1.3.1 高坝抗爆性能评价

水下爆炸冲击荷载下的结构动态响应及破坏机理研究主要局限于:经验法、理论解析法和数值法。经验法主要采用标准冲击曲线进行冲击试验,得到一些以经验公式和图表来评估结构的动态响应,此法简单,但精度较差。理论解析法主要以波动理论为基础,采用拟静力法求解具有一定边界条件和简单规则几何形状结构的抗爆性能。而水下爆炸的物理过程以及由此引起的大坝动力响应是一个复杂的过程,涉及炸药的起爆、爆炸波传播、介质与坝体结构的相互耦合作用、坝体压缩应力波的传播,理论解析法显得无能为力。数值方法是平行于经验法和理论方法的一种科研手段,并随着计算机硬件及计算方法的逐步完善,使得通过数值仿真方法模拟水下爆炸对结构的响应成为可能。然而,由于问题的复杂性,根据经验公式简化得到双直线爆炸荷载直接施加到结构上^[11, 12],将与实际的爆炸荷载时程曲线相差较大,回避了气体或液体与结构间的流固耦合相互作用过程,对于近场爆炸将会对结果带来较大的误差。

爆炸冲击荷载作用下的大坝动态响应及失事机理对评估大坝的抗爆安全性至关重要。然而,由于爆炸涉及炸药起爆、冲击波传播、介质动态耦合作用以及随后的结构动态响应等复杂问题,比常规静力和地震荷载作用下复杂得多。许多研究者对爆炸冲击荷载作用下的民用建筑结构、船舰以及军事设施等结构(如建筑结构^[13~17]、桥梁结构^[18~22]、地下结构^[23~28]、船舰结构^[29~31]、板梁结构^[32~36]等)的抗爆性能、破坏机理及毁伤特性进行了研究,包括采用数值方法模拟“9·11”事件中民航客机撞击美国纽约世界贸易中心爆炸致使其倒塌的过程(图1-7)^[37]。已有的部分研究成果(混凝土动态损伤本构模型、高效数值模拟理论与方法、抗爆安全与性能评价方法)可为坝工抗爆安全问题分析提供一定的参考。然而高坝建筑物的结构形式、地理位置、防护标准和要求等许多方面都与民用建筑结构、船舰以及军事工程等存在许多不同之处。

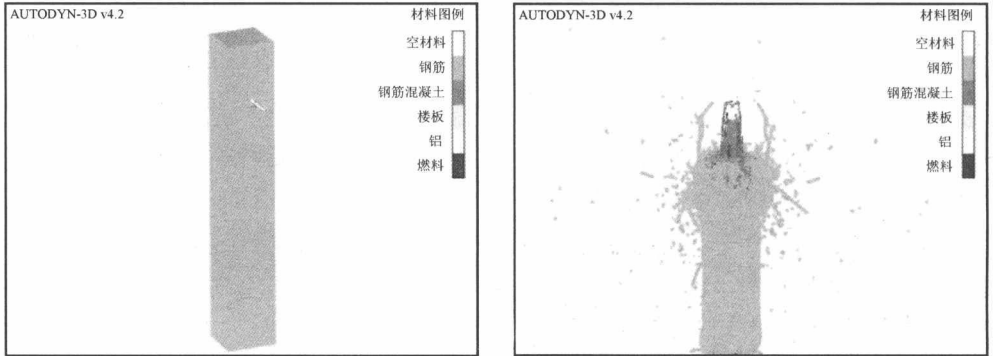


图 1-7 数值模拟美国纽约世界贸易中心倒塌过程^[37]

目前关于大坝抗爆性能的研究成果较少，主要集中在爆炸冲击荷载作用下大坝的动态响应和损伤破坏分析方面，大坝结构包括混凝土重力坝^[38~47]、混凝土拱坝^[12, 48, 49]、土石坝^[11, 50]等重大水工建筑物。

1. 混凝土重力坝抗爆性能评价

混凝土重力坝属于大体积混凝土结构，主要依靠自身重力来抵抗外部荷载以维持结构的稳定，其抗爆性能与其他建筑结构存在较大的差距。由于混凝土重力坝的大体积特性，早期人们认为混凝土重力坝具有较高的抗爆性能。如三峡大坝是由 2800 万 m^3 混凝土和 59.3 万 t 钢材构成的世界最大重力坝，因此铜墙铁壁，坚不可摧，即使是成吨炸药扔到上面，可能也不过让大坝破点皮，除非核武器，否则不可能撼动三峡大坝。当三峡大坝遭受 300 万 t 当量的核武器直接击中坝身时，大坝才会被炸出一个宽度在 100m 左右的巨大豁口。上述混凝土重力坝的抗爆性能是假定炸药直接命中坝体表面。

然而混凝土重力坝与一般的混凝土建筑物不同，大坝上游蓄有大量的库水。空气中的声速为 340 m/s，而水中的声速为 1483 m/s（为空气中声速的 4.36 倍）；标准大气压下空气的密度为 1.25 kg/m^3 ，而水的密度为 1000 kg/m^3 （约为空气的 800 倍）；空气介质的压缩性较大，而水的压缩性较小，通常被认为是不可压缩的，因此水积蓄能量的能力很低，当高能炸弹在水介质中起爆后，库水就成了冲击波的良好导体，瞬时形成了高温、高压的爆炸气体产物，其压力远远超过了周围水介质的静压，同时爆炸产生的高压气体会在水介质中产生水中冲击波，冲击波传播过程中膨胀做功。在相同炸药量下，水下爆炸冲击波将比空中冲击波大很多。因此，当炸药在水中爆炸时，即使只是普通的炸药，只要起爆方式恰当，都将对大坝构成巨大的威胁。国内外一些研究机构的计算表明，只需要大约 50 kg TNT，在水下 20 m 深度贴近坝体爆炸，就能使一座高度 80 m，蓄水深度 70 m 的重力坝产生明显的裂缝；如果药量增加到 300 kg，坝体就将产生贯穿性裂缝破坏，如果