

RESEARCHES ON THE STRUCTURAL SAFETY OF
HIGH CONCRETE ARCH DAMS

高拱坝结构安全 关键技术研究

主 编 朱伯芳 张超然
副主编 张国新 王仁坤 李文伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高拱坝结构安全 关键技术研究

主 编 朱伯芳 张超然
副主编 张国新 王仁坤 李文伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地研究了高拱坝结构安全的几个关键问题：①提出了关于混凝土坝的4个新理念：混凝土坝数字监控、混凝土半熟龄期、混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理及混凝土绝热温升试验新方法；②系统地研究了混凝土拱坝温控防裂问题，提出了小温差、早冷却、缓慢冷却等几个新的温控方法；③研究了库水温度、施工过程、渗透荷载等多种因素对高拱坝工作性态的影响；④研究了高拱坝承载能力的计算方法及多种因素对拱坝承载能力的影响；⑤研究了混凝土力学与热学性能；⑥对国内外已建拱坝和各国拱坝设计规范所采用的拱坝安全系数及拱坝安全评价方法进行了综合分析。

本书内容新颖而丰富，是水利水电工程界从事设计、施工、科研、管理的广大工程技术人员及高等院校相关专业师生的宝贵参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高拱坝结构安全关键技术研究 / 朱伯芳, 张超然主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.1
ISBN 978-7-5084-7342-0

I. ①高… II. ①朱… ②张… III. ①高坝: 拱坝: 混凝土坝—混凝土结构—研究 IV. ①TV642.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第040866号

书 名	高拱坝结构安全关键技术研究
作 者	主编 朱伯芳 张超然 副主编 张国新 王仁坤 李文伟
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 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 25.75印张 605千字
版 次	2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	90.00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

编写组成员名单

主 编 朱伯芳 张超然

副主编 张国新 王仁坤 李文伟

参编人员

章次	主要编写人	参加编写人
1	朱伯芳	贾金生 张国新 许 平 杨 萍
2	张超然 李文伟	孙志禹 郑 丹 樊义林 尹廷伟
3	朱伯芳	张国新 许 平 杨 波 杨 萍
4	张国新 刘 毅	杨 萍 刘有志 胡 平 赵文光
5	张国新 朱银邦	胡 平 杨 波 刘 毅
6	张国新 周秋景	杨 波
7	王仁坤 张 冲	陈丽萍 赵文光 计家荣 赵永刚
8	朱伯芳	张国新

前言

当前我国拱坝建设的规模是史无前例的，在建的锦屏（305m高）、小湾（295m高）和溪洛渡（285.5m高）三座拱坝的高度都超过了世界上已建成的最高拱坝——英古里拱坝（272m高），待建的300m级特高拱坝还有白鹤滩等数座拱坝。特高拱坝规模宏大，技术复杂，其安全问题是当前拱坝建设中人们关注的焦点。中国工程院于2007年设立咨询项目“高拱坝结构安全关键技术研究”，具体结合溪洛渡拱坝进行研究，历时2年，取得了比较丰富的成果，于2009年7月提出咨询报告。鉴于报告内容比较丰富，对我国当前拱坝建设有一定参考价值，经研究，将报告主要内容编辑成书，公开发表。

本书提出了关于混凝土坝结构和材料的四个新理念：混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理，混凝土坝的数字监控、混凝土的半熟龄期和大体积混凝土绝热温升试验新方法。

本书首次从理论上说明了混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理。每次强烈地震后，都有大量房屋、桥梁、道路受损甚至倒塌，但许多混凝土坝在遭受烈度Ⅷ、Ⅸ度的地震后损害却很轻微。混凝土坝平时即承受了巨大的水平荷载，而且安全系数较大，是混凝土坝具有较强抗震能力的根本原因。

本书首次提出了混凝土坝数字监控的新理念，把数字仿真分析、反分析与仪器观测有机地结合起来，形成大坝数字监控系统，从施工到运行的全过程中，对大坝的温度场、应力场、渗流场不断进行预报和监控。数字监控系统可望使混凝土坝安全监控水平上一个新台阶。

本书提出一个新理念，即：混凝土的半熟龄期。定义混凝土绝热温升和强度达到最终值一半时的龄期为相应的半熟龄期，半熟龄期越小，混凝土成熟得越快。分析结果表明，在相同条件下，混凝土绝热温升的半熟龄期由1.2d改为3.6d，就可使混凝土最大拉应力下降约40%。目前我国不少高坝混凝土半熟龄期偏小，半熟龄期的提出为改善混凝土抗裂性能提供了一个新的途径。

本书提出了混凝土绝热温升试验的新方法，目前大坝混凝土掺用粉煤灰较多，水泥水化作用推迟，龄期28d后仍在继续发热，现有试验方法只能测定

28d内绝热温升,本书提出了新的试验方法,可测定90~180d内绝热温升。

溪洛渡水电站大坝的混凝土约600万 m^3 ,到目前为止,已对混凝土原材料选择、配合比优选、混凝土力学和热学性能进行了长时间的系统的试验和调研。对多个厂家的水泥、粉煤灰、外加剂的性能进行了试验和优选,判定了当地骨料不具有碱活性,在大量试验基础上,推荐了混凝土配合比,进行了强度、极限拉伸、弹性模量、自生体积变形、热学性能、徐变等试验,进行了全级配试验以分析试件尺寸与湿筛的影响,并正在积极筹备国内首次长期持荷下的强度试验。从目前试验资料来看,该坝混凝土弹性模量略偏大, $E_{180}=40\sim 48\text{GPa}$;徐变偏小,不利于温度控制,所幸该坝混凝土线膨胀系数 $\alpha=6.5\times 10^{-6}/\text{C}$,其值小于一般大坝混凝土的 $10\times 10^{-6}/\text{C}$ 。据目前试验资料,溪洛渡大坝混凝土绝热温升的半熟龄期只有1.1~1.4d,即在1.1~1.4d之内水化热温升就完成一半,半熟龄期太小,温度上升太快,不利于大坝的温控防裂,建议下一阶段研究予以改进。

抗裂安全系数偏低是混凝土坝产生裂缝的重要原因,在条件许可的前提下,应尽量适当提高混凝土坝抗裂安全系数。

有的高拱坝在施工中出现了较多裂缝,主要由于两个原因:①只进行初冷和后冷两期冷却,冷却次数太少,温差太大;②浇筑块长度 $L=60\sim 80\text{m}$,而冷却区高度 b 只有12m左右,对于 $L=20\sim 30\text{m}$ 的传统小浇筑块, $b=12\text{m}$ 并不小,对于 $L=60\sim 80\text{m}$ 的大浇筑块, b/L 太小,约束作用偏大。

本书建议今后改用小温差、早冷却、缓慢冷却方式,在不影响施工进度前提下,可显著提高抗裂安全度,主要内容包括:在时间上增加冷却次数,以减小温差,由过去的2次冷却(初冷+后冷)增加到3~4次冷却,即1次初冷+2~3次后冷,温差 T_0-T_w 由过去的 $20\sim 25\text{C}$ 减小到 10C 以下,由于温差小了,后冷可提前进行,增加了冷却时间,徐变得得到充分发展,减小了温度应力;在空间上加大冷却层高度,减小竖向温度梯度,在铅直方向,建议分为三个冷却区。采取这些措施后温度应力可显著减小。

对于特高拱坝,除了设计阶段应做好温度应力研究和温控方案的优选外,建议施工阶段做好反馈温度控制,选择若干坝块进行现场跟踪观测,根据现场观测和仿真分析结果提出新的温度控制方案。在建立大坝数值监控系统后,施工中可采用它来改进温控方案。

特高拱坝应力水平很高,本书系统地研究了诸多因素对高拱坝应力状态的影响,包括自重施加方式、岩基渗流场、非线性温差、库水温度变化等因素的影响。对溪洛渡坝、柯尔布兰坝等多座拱坝进行了非线性有限元分析,

系统地研究了屈服准则、加载方式等因素的影响及各工程计算结果的对比。

对国内外几座拱坝进行了非线性计算，计算结果表明，考虑压缩破坏后，超载系数显著降低，过去不少拱坝非线性计算中只考虑拉伸和剪切而忽略压缩破坏，所得超载系数显然偏高。从计算结果还可以看出，有贴脚溪洛渡拱坝的超载能力是比较高的。

我国先后颁布了3部拱坝设计规范：SD 145—85《混凝土拱坝设计规范》（以下简称“老规范”），SL 282—2003《混凝土拱坝设计规范》（以下简称“水规”）和DL/T 5346—2006《混凝土拱坝设计规范》（以下简称“电规”）。“老规范”和“水规”采用安全系数法，“电规”采用多项系数法，表达形式相差很大，但拱坝安全系数本质上是经验系数，不论采取什么形式，其数值都来自国内外拱坝建设的实际经验，因此实际的安全度比较接近。按15cm立方体、90d龄期、80%保证率强度折算，基本荷载组合的抗压安全系数依次为：“老规范”4.2、“水规”4.0、“电规”4.4、二滩4.0、溪洛渡4.4。

关于拱坝应力分析方法，我国过去采用拱梁分载法，目前“水规”和“电规”都已引入有限元等效力法。实际经验表明，这两种方法获得的坝体压应力相近，由于假定自重全部由梁承担，拱梁分载法获得的坝体上游面拉应力偏小。从国内外发展情况来看，今后逐步向有限元法过渡的倾向是十分明显的。

关于抗滑稳定分析，目前主要采用刚体极限平衡法。国内特高拱坝，都进行了三维有限元计算，一种是根据线弹性有限元的应力场，通过积分计算可能滑移体的各个面力、体力及抗滑安全系数；另一种是非线性有限元超载计算。有限元法的计算精度较刚体极限平衡法有所提高。拱坝安全系数的取值关系到坝的安全性和经济性，安全系数本质上是经验系数，来自各国建坝的实际经验，并与拱坝计算方法及材料试验方法有密切关系。本书对国外拱坝设计规范安全系数及各国拱坝实际采用的安全系数进行了系统的综述与分析。

由于工程重要、应力水平高、潜在的不安全因素较多，特高拱坝的安全系数理应高于一般拱坝，至少不能低于一般拱坝。

由于编写时间短，编著水平有限，书中难免有不妥之处，欢迎读者批评指正。

朱伯芳 张超然

2009年9月23日

目录

前言

第 1 章 混凝土坝的几个新理念	1
1.1 混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理	1
1.2 混凝土坝的数字监控——提高大坝安全监控水平的新途径	12
1.3 混凝土的半熟龄期——改善混凝土抗裂能力的新途径	20
1.4 大体积混凝土绝热温升试验新方法	30
参考文献	34
第 2 章 混凝土力学与热学性能研究	36
2.1 概述	36
2.2 混凝土原材料优选试验研究	36
2.3 大坝混凝土配合比试验	39
2.4 大坝混凝土性能	42
2.5 全级配混凝土性能试验研究	68
2.6 混凝土性能与时间的关系	85
参考文献	90
第 3 章 混凝土坝温度应力的几个问题	92
3.1 概论	92
3.2 混凝土坝抗裂安全系数	92
3.3 混凝土坝表面保护材料	100
3.4 混凝土高坝施工过程中长期保温的必要性	104
3.5 混凝土拱坝运行期裂缝与永久保温	108
3.6 混凝土坝水管冷却温度场与应力场计算方法	117
3.7 水管冷却自生温度徐变应力的理论解	123
3.8 混凝土坝水管冷却自生温度徐变应力的数值分析	126
3.9 混凝土坝水管冷却的利与弊	132
3.10 混凝土坝后期水管冷却方式研究	139
3.11 加密塑料水管强化混凝土冷却	154
3.12 小温差早冷却多期缓慢冷却是混凝土坝水管冷却的新方向	158
3.13 水管间距与温差的协调	159

3.14	混凝土坝水管冷却的有关建议	162
3.15	混凝土坝温度应力研究和控制方法的改进及反馈温度控制	163
3.16	结语	163
	参考文献	164
第4章	溪洛渡高拱坝的温控防裂	166
4.1	混凝土坝温度应力仿真与非线性分析程序 SAPTIS	166
4.2	高拱坝温度应力的特点和对策	172
4.3	大体积混凝土的真实抗裂能力	178
4.4	溪洛渡拱坝温控标准和最高温控措施	185
4.5	溪洛渡拱坝混凝土自生体积变形对温度应力的影响	193
4.6	溪洛渡高拱坝的通水冷却问题	201
4.7	气温骤降与表面保温研究	209
4.8	溪洛渡设计温控标准和温控措施	213
4.9	河床坝段温控措施的敏感性分析	217
	参考文献	225
第5章	高拱坝真实工作性态研究	227
5.1	高坝深库的真实库水温度	227
5.2	自重施加方式与初次蓄水过程对特高拱坝应力的影响	243
5.3	坝基水荷载施加方式对坝体应力的影响	247
5.4	运行期温度边界条件的变化对坝体应力的影响	277
	参考文献	300
第6章	高拱坝承载能力研究	301
6.1	高拱坝应力及变形的非线性分析方法	301
6.2	岩石与混凝土材料的非线性模型	311
6.3	拱坝超载安全度影响因素研究	313
6.4	溪洛渡拱坝非线性超载分析	322
6.5	高拱坝极限承载力类比分析	333
6.6	结语	338
	参考文献	338
第7章	国内外已建拱坝及各国拱坝设计规范中拱坝安全系数分析	340
7.1	国内外拱坝强度安全控制综述	340
7.2	国内外拱座抗滑稳定分析准则	359
7.3	高拱坝整体稳定安全分析与评价	375
7.4	结语	386
	参考文献	388

第 8 章 综合分析	391
8.1 关于混凝土坝的几个新理念	391
8.2 混凝土的力学与热学性能	392
8.3 混凝土坝温控与防裂	393
8.4 高拱坝应力分析方法及应力状态的影响因素	394
8.5 高拱坝承载能力与安全系数	395

第 1 章 混凝土坝的几个新理念

1.1 混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理

通过分析国内外重大地震对混凝土坝造成的损害,其结果表明,与房屋、桥梁、道路等相比,混凝土坝具有更强的抗地震能力。从理论上讲,混凝土坝之所以具有较强的抗地震能力,是由于平时即承受了巨大的水平荷载且安全系数较高。混凝土坝对巨大水平荷载的安全度保证了它耐强烈地震而不垮。在我国继续兴建水坝,既是必要的,也是安全的,本节就混凝土坝抗震设计与抗震措施提出了一些建议。

1.1.1 绪言

2008年5月12日,四川汶川特大地震给人民生命财产造成了重大损失。地震中,有2380多座水坝受到一定程度的损害,其中绝大部分是小型土石坝;损害主要表现为坝坡局部坍塌、坝体裂缝等,未发生垮坝事故。但如果垮坝,大量库水下泄,灾害将异常巨大。因此,汶川地震后,人们对强震区内修建高坝大库的安全性特别关切是十分自然的。我国100m以上的高坝绝大部分是混凝土坝,近期在建或即将兴建的许多200m以上的高坝也多是混凝土坝,并且大多处于强烈地震区,本节着重讨论混凝土坝的抗地震问题。

首先,分析国内外混凝土坝实际遭受的地震损害。每次强烈地震后,都有不少房屋、桥梁严重受损,甚至倒塌,但除了1999年中国台湾“9·21”大地震中石冈重力坝由于活断层穿过坝体而有三个坝段破坏外,至今还没有一座混凝土坝因地震而垮掉,许多混凝土坝遭受烈度Ⅷ、Ⅸ度强烈地震后,损害轻微,可以说在各种土木水利工程中,混凝土坝是抗地震能力最强的。

我们首次从理论上阐明了,混凝土坝之所以具有较强的抗地震能力,是由于它在平时即以水平荷载为主,且有较大安全系数。我国水资源十分短缺,而且时空分布极不均衡,国民经济的持续发展和人民生活水平的提高都离不开水利水电工程的建设,在我国继续兴建水坝,既是必要的,又是可行的。当然,在强震区筑坝,应特别重视坝的安全,要尽量远离活动断层,要重视地基的稳定性和工程设计施工的质量,并采取必要的抗震措施。

1.1.2 混凝土坝是抗震能力最强的结构

实践经验表明,在各种土木水利地面工程中,混凝土坝是抗震能力最强的结构。

1.1.2.1 1999年台湾“9·21”大地震中的几座混凝土坝^[1]

1999年9月21日,我国台湾省南投县发生了一次7.3级地震,震源深度8km。地震

是由于车笼埔断层的破裂而引起的，破裂总长度 105km，震中最大地面加速度 1.01g。地震造成 2295 人死亡，房屋全倒 20815 户，半倒 17978 户，多栋 12 层以上的大楼拦腰折倒；多处大规模山崩阻塞河道造成堰塞湖；山崩及桥梁损坏致 600 多处公路交通中断；由于土壤液化，引发地面喷砂、地层下陷、结构倾斜。地震区内有多座水坝，石冈重力坝因活断层通过坝体而三个坝段被毁，其他水坝损害轻微。

(1) 石冈重力坝。石冈混凝土重力坝，坝高 21.4m，长 352m，坝顶装有宽 12.8m、高 8.0m 弧形闸门，共 18 道（见图 1.1.1）。

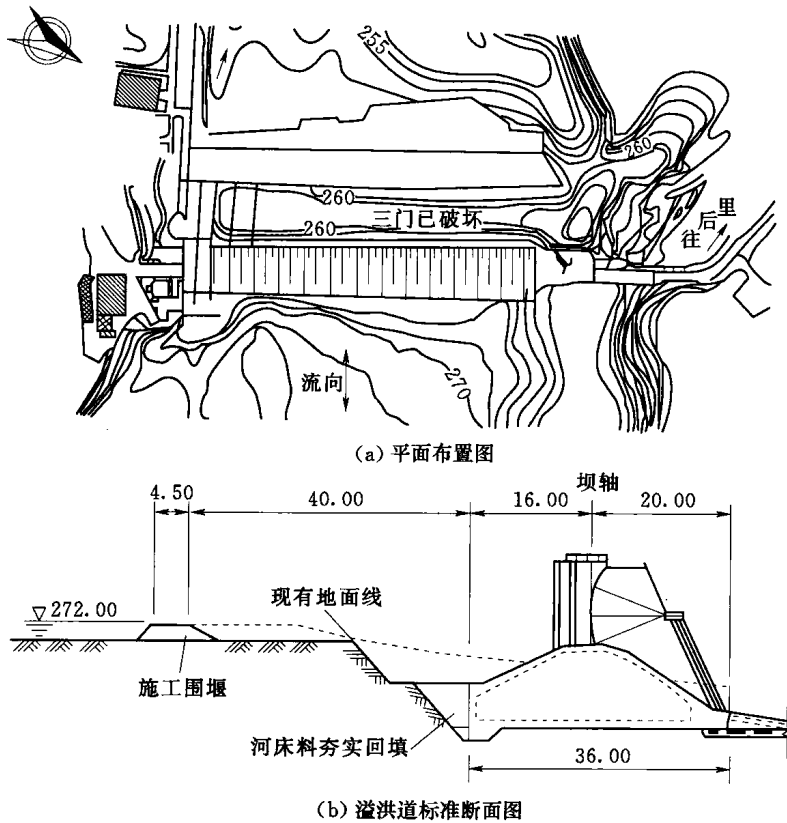


图 1.1.1 石冈重力坝（单位：m）

地震前车笼埔断层在石冈坝下游 3km 处通过。“9·21”地震发生时，在坝址上下游附近新产生了 8 条次断层，引起地层破裂，其中一条次断层恰好通过石冈坝的右侧坝轴线，左侧断层上盘上升了约 9.8m，下盘上升只有 2.2m，使坝体两侧产生了约 7.6m 的垂直错动。活断层通过处，三个坝段被毁，断层两边坝顶高程相差 7.6m。地震时附近地震台实测最大加速度，东西向 0.581g，南北向 0.418g，垂直向 0.489g，这是到目前为止全世界唯一的被地震完全摧毁的混凝土坝。除坝体外，在坝址上游 400m 及 1500m 处，河床也分别隆起了约 6m 及 3.5m，并在河床中形成了瀑布的奇观。该坝共 20 余坝段，除了活断层穿过处的 3 个坝段被毁外，其余坝段虽然紧靠活断层，经受了强烈震动，并未损坏（见图 1.1.2）。震后在上游修筑围堰挡住三个被毁坝段，工程继续运用。表明了混凝土坝的巨大抗地震能力。



图 1.1.2 石冈重力坝三个坝段破坏情况

(2) 雾社重力坝。雾社坝高 114m，长 213m，设计最高水位为 1005.00m，“9·21”地震时水位为 999.24m。在坝顶高程 1005.85m 及坝底部廊道高程 915.88m 处，设有地震仪，测得最大水平加速度分别为 1.018g 及 0.282g（无铅直方向地震仪）。地震之后，坝体本身并无重大的损伤，只有一些轻微损害。

(3) 谷关拱坝。谷关混凝土拱坝，坝高 85.1m，坝顶长 149m。地震后下游坝面一条原有裂缝扩展成长约 25m 的斜裂缝，最大宽度 1~2mm；另外还有一些较短的斜裂缝。最大水平加速度约 0.4g，震后放空水库，对裂缝进行了修补。

(4) 德基拱坝。德基双曲薄拱坝，坝高 181m，坝顶长 290m，坝顶拱冠厚度 4.5m，坝底拱冠厚度 20m，坝顶高程 1411.00m，正常满水位 1408.00m，正常运转低水位 1361.00m。“9·21”地震发生时，水位 1394.60m。地震后大坝总体状态良好，唯一的异常是坝基渗水量明显增加，渗出的水是清水，1 个月后渗水量即逐渐减小。地震前后，坝内垂线仪测得的坝体位移无异常现象。距坝址 2km 的一个强震台的实测记录显示，最大地面加速度为东西向 0.53g，南北向 0.52g，竖直向 0.23g，但强震台位于高山上，高程为 1510.00m，比德基坝基岩高程 1230.00m 高出 280m，有一定放大作用，估计德基坝基底实际最大水平加速度约为 0.4~0.5g。

1.1.2.2 帕柯依马拱坝震害

美国加州的帕柯依马 (Pacoima) 拱坝是到目前为止全世界唯一的受地震损害较重的一座拱坝。坝高 113m，坝顶弧长 180m，于 1928 年建成。由于左岸地质条件差，有一剪切带，建成时的坝高比原设计降低约 3m，并在左岸设置重力式推力墩。该坝用纯拱法设计并用拱冠梁法校核，运行近 40 年后，于 1967~1968 年对坝体安全进行了复核，采用径向试载法计算，荷载包括全水头+自重+0.15g 水平地震；结果表明，坝体应力无问题，但在地震荷载作用下，左岸坝肩抗滑稳定处于边缘状态。

1971 年 2 月 9 日发生了一次由 San Fernando 断层破裂引起的 6.6 级地震，震源深度 12.8km，震中在坝址北面 6.4km 处，发震断层在坝下深度为 4.8km。一台强震仪设置在

左岸山脊上, 离坝 37m, 比坝顶高 15m。实测水平方向最大加速度 1.25g, 竖向加速度 0.7g; 由于强震仪设置在节理发育的陡峭山脊上, 考虑地形地质条件推算河谷的地面峰值加速度为 0.50g。震后整个山体铅直方向上升了 1.28m, 水平方向移动了 2.0m, 坝轴线沿顺时针方向旋转了 30"。震后左坝肩与推力墩之间的收缩缝张开了 6.35~9.7mm, 拱坝本身及大坝与基岩接触面均完好无损。如图 1.1.3 所示, 左坝肩受扰动的岩体分为 A 和 B 两部分, 推力墩建在岩体 B 上, B 与 A 都沿破裂面 1 移动过, 但岩体 B 只有轻微移动, 岩体 A 则沿破裂面 2 与岩体 B 分开, 并沿破裂面 1 有较大移动, 铅直方向移动 0.2m, 水平方向移动了 0.25m, 钻孔表明, 左坝肩山体下部未受破坏。

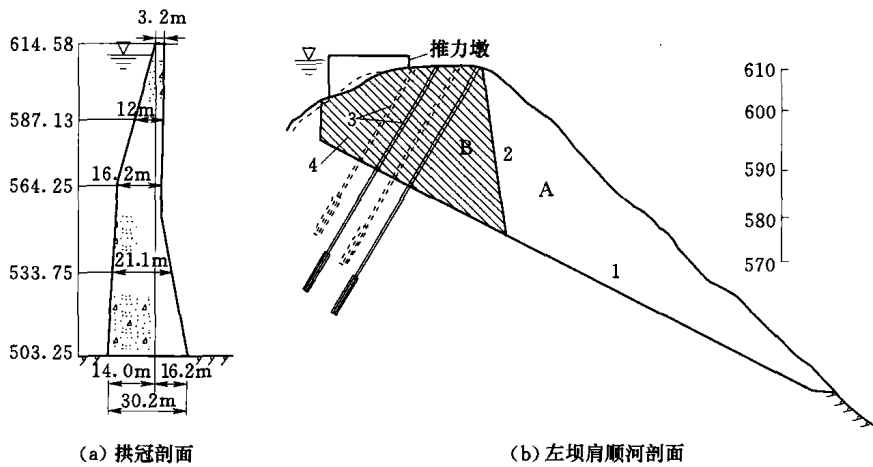


图 1.1.3 Pacoima 拱坝
1—破裂面 1; 2—破裂面 2; 3—锚索; 4—锚固段

按照地震时的实际水位 (高程 570m), 考虑到地形和地质条件的影响, 取实测地震加速度的 2/3 进行动力计算, 最大压应力和拉应力分别为 6.31MPa 和 5.16MPa, 坝体并无明显损伤或裂缝。

震后修补措施: ①用 35 根预应力锚索将左岸岩体锚固, 每根锚索作用力为 3087kN; ②对坝与推力墩之间张开的接缝及推力墩上裂缝进行灌浆; ③对左岸坝肩进行固结灌浆, 对全坝基岩进行了新的帷幕灌浆。

1994 年 1 月中旬附近又发生了一次 6.6 级地震, 地面加速度 0.49g, 左坝肩与推力墩之间接缝又张开 47mm, 推力墩也裂开并沿铅直方向向下面移动 13mm, 沿水平方向朝下游也移动 13mm, 大坝未受到重大损伤。

帕柯依马拱坝提供了两点重要启示: ①左坝肩 1991 年地震时移动了, 经过加固, 1994 年地震时又移动了, 说明地质和地形条件对拱坝抗震十分重要; ②1991 年地震时库水位低于坝顶 45m, 坝体无损伤, 说明低水位时拱坝仍有相当好的抗震性能。

1.1.2.3 其他混凝土坝的震害

2008 年 5 月 12 日发生的 8 级四川汶川特大地震中, 沙牌碾压混凝土拱坝, 高 132m, 距震中 30km, 当地烈度 VIII 度, 震后大坝损害轻微; 通口碾压混凝土重力坝, 高 71.5m, 设防烈度 VII 度, 实际烈度 IX 度, 坝体损害轻微。



我国广东省新丰江单支墩大头坝，最大坝高 105m，1959 年建成。1962 年 3 月 19 日发生的水库地震，震级 6.1 级，距震中 6km，坝址地震烈度Ⅷ度，震后右岸坝段在靠近顶部断面变化处出现了一条长达 82m 的水平裂缝，左岸同高程也有较小的不连续裂缝，事后对坝体进行了补强加固。

意大利北部的 Ambiesta 拱坝，最大坝高 59m，坝顶长 145m，设有周边缝。1976 年 5 月 6 日附近发生 6.5 级地震，震中距坝 22km，坝址地震烈度达Ⅸ度，左坝座处实测最大加速度为 0.33g，经过地震该坝未受到任何损害。

智利北部的拉贝耳拱坝，最大坝高 112m，坝顶长 116.5m，顶部厚 5.5m，底部厚 18.45m，坝的两侧布置有带 3 孔溢洪道的推力墩。为了防止空库时坝受地震倒向上游，在坝内埋有一条由 144 根 $\phi 36\text{mm}$ 钢筋组成的钢筋带，分布在坝顶以下 38m 处。1985 年 3 月 3 日当地发生 7.7 级地震，震中距坝 80km，实测最大加速度横向 0.31g，顺河向 0.114g，垂直向 0.11g，坝体未受损伤。

日本的鸣子拱坝（坝高 95m），1964 年新潟地震时距震中 140km，拱坝的接缝和廊道有渗漏量增加和水质变浑现象，但以后又恢复正常。日本上椎叶拱坝（坝高 110m）和绫北拱坝（坝高 75m）也经受过中等程度地震，黑部第四拱坝（坝高 180m）施工将结束时受到 0.18g 地震，均未受损害。

1967 年 12 月 11 日，在印度的柯印纳发生了一次水库地震，震级 6.4 级，距震中 15km 的柯印纳重力坝因受震而产生了严重裂缝。该坝由蛮石混凝土建造，坝高 103m，底宽 70.2m。地震时实测地面最大加速度顺坝轴方向为 0.63g，顺水流方向为 0.49g，竖直方向为 0.34g。震后，在一些坝体的上游面和下游面都产生了裂缝，主要水平裂缝是在坝体坡面改变处，事后在下游面建造支墩以加固坝体。

表 1.1.1 中列出了国内外已建混凝土坝震害情况。

表 1.1.1 国内外已建混凝土坝震害情况

坝名	国家	建成时间 (年)	坝型	坝高 (m)	地震日期 (年.月.日)	震中距 (km)	震级	烈度	地面加 速度	震害
新丰江	中国	1959	大头坝	105	1962.3.19	1.1	6.1	Ⅷ		坝体上部断面突变处产生水平裂缝
西菲罗	伊朗	1967	大头坝	106	1990.6	32	7.3~ 7.7			断面突变处产生水平裂缝，缝宽 1cm，向下游错动 2cm
柯印纳	印度	1963	重力坝	103	1967.12.10	3.0	6.3		坝内廊道 水平 0.51g, 竖向 0.36g	坝体断面突变处产生水平裂缝
通口	中国		重力坝	71.5	2008.5.12		8.0	Ⅸ		轻微损害
雾社	中国	1959	重力坝	114	1999.9.21		7.3		坝顶 1.02g, 坝底 0.28g	无重大损害



续表

坝名	国家	建成时间 (年)	坝型	坝高 (m)	地震日期 (年.月.日)	震中距 (km)	震级	烈度	地面加 速度	震害
石冈	中国	1977	重力坝	21.4	1999.9.21		7.3		水平 0.57g, 竖向 0.48g	活断层穿过坝轴线处,三个坝段被毁,断层两边坝体错动 7.6m,其余坝段完好
沙牌	中国	2005	拱坝	132	2008.5.12	30	8.0	Ⅷ		损害轻微
谷关	中国	1961	拱坝	85.1	1999.9.21	51	7.3		水平 0.4g	坝体老裂缝扩展,也产生了一些新裂缝
德基	中国	1974	拱坝	181	1999.9.21		7.3		水平 0.4~ 0.5g	坝基渗水增加,渗出清水,不久恢复正常
帕柯依马	美国	1928	拱坝	113	1971.2.9	6.4	6.6		水平 1.25g, 竖向 0.7g	损害较大,推力墩与坝体间接缝张开,推力墩本身裂开并略有移动,左坝肩岩体大面积坍塌
大吐君盖	美国	1932	拱坝	77	1971.2.9	32	6.6			渗漏增大
勃拉希溪	美国	1970	拱坝	65	1973		6.6			渗漏增大
吉勃拉塔	美国	1920	拱坝	50	1925.6.25		6.3	Ⅶ		渗漏增大
拉比	美国	1938	拱坝	76	1947.11.13			Ⅶ		无损伤
巴洛沙	澳大利亚	1902	拱坝	36	1954.3.1		5.5			坝体有裂缝
拉贝尔	智利	1968	拱坝	112	1985.3.3	80	7.7	Ⅷ	顺河 0.31g, 横河 0.114g	坝顶裂缝
卡勃里尔	葡萄牙	1954	拱坝	136	1969.2.28		8	Ⅵ		无损伤
奥迪克塞拉	葡萄牙	1958	拱坝	41	1969.2.28		8	Ⅶ		渗漏增大

1.1.3 混凝土坝抗震能力较强是由于平时以水平荷载为主且安全系数较高

1.1.3.1 地震荷载方向的重要意义

地震时在水平方向和铅直方向都有地面加速度,例如Ⅸ度地震时,水平方向加速度约为 0.4g,铅直方向加速度约为 0.2g。

如果只有铅直方向加速度 0.2g,即使设计中没有考虑地震,房屋、桥梁等结构也是不会垮的,因为静力设计中已考虑 1.0g,安全系数约为 2.0。在地震时,即使由于动力放大作用铅直地震荷载为 0.3~0.4g,总荷载为 1.3~1.4g,仍然小于 2g,结构不致垮掉,可见引起破坏的主要是水平地震力,铅直地震力是次要的。



在水平荷载方向，房屋、桥梁等结构与混凝土坝是有重大差别的。对于房屋、桥梁等一般土木工程结构，水平荷载主要有风荷载和地震荷载两种，而风荷载远小于地震荷载，结构安全系数只有 2.0 左右，如果在设计中没有考虑地震或地震设防烈度偏低，遇到强烈地震时就难免失事。

混凝土坝的情况完全不同。混凝土坝平时即承受着库水产生的巨大的水平荷载，而且安全系数较高，即使平时没有考虑地震，平时设计中对水平荷载的安全储备已足以抵抗Ⅷ、Ⅸ度地震，这就是混凝土坝耐强烈地震而不垮的根本原因。到目前为止，除非活断层通过坝体，还没有一座混凝土坝因地震而垮掉，其中有的坝在设计中没有考虑地震。有不少混凝土坝由静荷载决定坝体剖面，对地震荷载进行了校核，但由于特殊荷载下安全系数放宽，校核后并未修改坝体剖面，但这些混凝土坝都经受了强烈地震而损害轻微。

1.1.3.2 混凝土坝与一般土木工程结构受力特性的差别

对于房屋或烟囱等工业民用建筑（参见图 1.1.4）：

$$\left. \begin{aligned} W &= W_1 + W_2 \pm W_3 \\ Q &= Q_1 + Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

式中： W_1 为自重、设备重等呆荷载； W_2 为活荷载； W_3 为铅直向地震惯性力； Q_1 为风荷载； Q_2 为水平地震荷载。

对于水坝，则

$$\left. \begin{aligned} W &= W_1 \pm W_3 - U \\ Q &= Q_1 + Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.2)$$

式中： W_1 为坝体自重； W_3 为铅直向地震惯性力； U 为扬压力； Q_1 为静水推力； Q_2 为地震荷载，包括动水压力和坝体水平惯性力。

对于一般的工业和民用建筑来说，铅直荷载是主要荷载，水平荷载中，风荷载远小于地震荷载。例如，高度 100m、直径 5.0m、厚度 0.3m 的钢筋混凝土烟囱，风荷载 $Q_1 = 350\text{kN}$ ，烈度Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度地震水平荷载 Q_2 分别为 1627kN、3255kN、6510kN，如果设计中未考虑地震，只考虑了风荷载，并按传统取安全系数 1.8，如遭遇Ⅶ度地震时，地震水平荷载 Q_2 为风荷载的 4.65 倍，结构难以承受。又如设计中只考虑了Ⅶ度地震，实际遭遇Ⅸ度地震，实际水平荷载为设计值的 4 倍，也难免失事。

混凝土坝的情况则截然不同。建坝的目的就是为了挡水，因此库水引起的巨大的水平推力是混凝土坝必须承受的基本荷载，设计规范中采用的安全系数也较大，抗滑安全系数不小于 3.0，抗压安全系数不小于 4.0^[2,3]，这意味着正常设计和施工的混凝土坝可以承担约相当于 3 倍水荷载的水平推力，地震破坏力主要来自水平力，例如，一座高 155m 的混凝土重力坝，静水压力 $Q_1 = 112500\text{kN}$ ，Ⅷ度地震的水平推力（包括动水压力和坝体惯性力） $Q_2 = 97000\text{kN}$ ，即使满库时发生Ⅷ度地震， $(Q_1 + Q_2) / Q_1 = 1.86 < 3.0$ ，坝体仍是安全的。这就是在Ⅷ、Ⅸ度地震作用下大量房屋、桥梁倒塌而混凝土坝却安然无恙的根本原因。

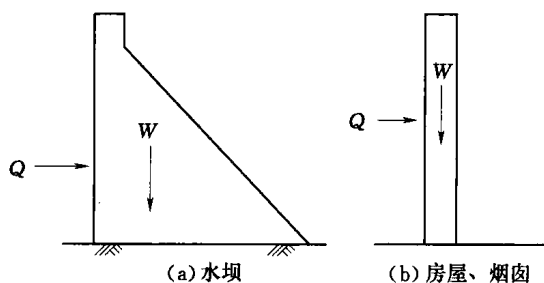


图 1.1.4 结构荷载