

2004 水力发电国际研讨会 论文集

(上 册)

主办单位：中国长江三峡工程开发总公司
湖北清江水电开发有限责任公司
中国水力发电工程学会
中国水利学会



2004年5月24-26日 湖北 宜昌

2004 水力发电国际研讨会

2004 年 5 月 24-26 日 湖北 宜昌

论文集

(上册)

高面板坝设计、施工及监测

目 录 (上册)

美国大坝管理中的焦点问题	1
<i>Robin G. Charlwood</i>	
中国混凝土面板堆石坝的近期进展	9
<i>蒋国澄, 赵增凯</i>	
水布垭混凝土面板堆石坝设计及特点	14
<i>吴晓铭</i>	
洪家渡高面板堆石坝设计与施工	18
<i>杨泽艳, 王德军, 陈康</i>	
高混凝土面板堆石坝设计和施工评述	26
<i>Manoel de Souza FREITAS, Jr.</i>	
珊溪水库混凝土面板堆石坝设计	33
<i>陈振文</i>	
公伯峡水电站混凝土面板堆石坝体形设计优化综述	40
<i>杜清平, 武选正</i>	
新耶撒坝	44
<i>F. Molina, A. Nuñez, R. Lafuente, J. Carlos de Cea, J. M. Villarroel, J. L. Martinez</i>	
沟后混凝土面板砂砾石坝修复设计	51
<i>袁辉, 张彩莲</i>	
混凝土面板堆石坝的渗漏	56
<i>Paulo T. Cruz, Rua Haddock Lobo,</i>	
面板堆石坝数值分析研究若干问题	64
<i>徐泽平</i>	
高围压下堆石体流变本构研究及数值模拟	72
<i>周伟, 常晓林, 程展林</i>	
深厚覆盖层中混凝土面板堆石坝防渗墙的变形研究	82
<i>侯瑜京, 徐泽平, 梁建辉</i>	
水布垭面板堆石坝坝体分区优化有限元分析	90
<i>陈云, 饶锡保, 程展林</i>	
狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究	97
<i>徐泽平, 邵宇, 梁建辉</i>	
高面板堆石坝应力变形的三维子模型法研究	104
<i>汪明元, 程展林, 林绍忠</i>	
混凝土面板堆石坝的动力反应特性	111
<i>H. KAWASAKI, K. INAGAKI, K. INAGAKI</i>	
建在倾斜基础面上的混凝土面板堆石坝筑坝材料研究	117
<i>肖贡元</i>	
面板坝利用软岩坝料的研究和探讨	124
<i>傅志安</i>	
混凝土面板堆石坝软岩坝料开采填筑技术研究	129
<i>邢皓枫, 龚晓南, 傅海峰</i>	
堆石坝面板收缩性贯穿裂缝的理论分析及防裂措施	137
<i>张国新, 厉易生</i>	

面板堆石坝面板开裂机理探讨与防止措施研究	142
孙 役, 燕 乔, 王云清	
面板堆石坝混凝土面板裂缝原因分析	147
李 军, 王琛, 杨 辉	
高混凝土面板堆石坝面板混凝土抗裂和耐久性研究	156
马锋玲, 杨德福, 王少江	
WHDF 抗裂剂对面板砼抗裂性能的影响及其改良	162
喻幼卿, 汪金元, 李定或	
钢纤维混凝土在龙首二级水电工程面板抗裂中的应用	167
周国强, 张运淑	
高面板堆石坝混凝土面板温度及干缩应力研究	174
杨 萍, 胡 平, 黄淑萍, 贾树云	
混凝土面板堆石坝施工期面板干缩应力研究	181
王瑞骏, 陈尧隆	
试验面板堆石坝的建造	188
H. Soda, S. Omae, M. Nonaka, N. Sato, I. Omoto	
吉林台一级水电站面板坝周边缝自愈型止水结构的研究	195
鲁一晖, 赵立远, 彭卫军, 郝巨涛, 赵波	
马来西亚 Bakun 混凝土面板堆石坝周边缝表层止水结构和止水材料研究	201
郝巨涛, 陈肖蕾, 刘增宏, 杜振坤	
低温改性 GB 复合三元乙丙材料在松山水库面板冬季修复中的应用	210
孙志恒, 陈维江, 郝巨涛, 鲍志强	
面板堆石坝垫层施工新技术	214
徐中秋	
面板堆石坝挤压式混凝土边墙技术在水布垭面板坝中的应用	220
王亚文, 廖光荣, 周俊方	
面板堆石坝填筑施工质量 GPS 实时监控系统方案研究	227
吴晓铭, 燕乔	
龙首二级水电站工程施工关键技术	232
马福民, 杜立宏, 何小雄, 靖 谋	
喀浪古尔水库面板混凝土防裂施工措施及工艺改进	237
杨伟	
面板砼滑模施工工艺的改进	242
张天亮	
榆树沟水库溢流砼面板坝坝体溢洪道施工技术研究	247
王建筑	
水布垭高面板堆石坝监测新技术探讨	254
闫生存, 胡颖, 孙役, 曾祥虎	
k30 (k50) 法检测坝料填筑质量技术在公伯峡高面板坝工程的应用研究	257
赵继成, 徐联红, 李宏伟	
严寒地区沥青护面的合理设计和施工系统	264
J. TAKANO, M. YABU, T. SUGAWARA	
沥青混凝土护面水库的设计及信息技术在大规模土石方工程的应用	272
Y. TASHIRO, T. SASADA, Y. ANA, K. ARIMURA, T. SUGAWARA	

水工沥青混凝土防渗技术发展现状及在中国的应用	279
杜振坤, 贾金生, 卢正超, 陈肖蕾	
水布垭大坝河床砂卵石覆盖层强夯处理施工	286
张安平, 谭必轩	
公伯峡水电站上下游围堰防渗技术	293
杜清平, 武选正	
深厚覆盖层坝基防渗处理及混凝土防渗墙设计	299
周建平, 陈观福	
大渡河瀑布沟水电站大坝基础混凝土防渗墙与心墙连接型式研究	307
陈红, 陈刚, 覃朝明, 张建华	
大渡河瀑布沟水电站大坝基础防渗墙施工探讨	315
张建华, 严军, 覃朝明	
以科学的发展观为指导, 建立生态环境友好的水电建设体系	320
高季章	
2003 年中国及世界大坝统计情况	329
贾金生, 袁玉兰, 李铁洁	

美国大坝管理中的焦点问题

Robin G. Charlwood

US Society for Dams & Acres International

SEATTLE, WA USA

摘要: 本文旨在回顾作为水力发电、防洪、供水之用的美国大坝的现状和主要作用，主要内容包括在建大坝的建设，已建大坝的修复、改造，以及某些大坝的拆除。本文归纳了当前大坝管理工作，包括大坝监测过程中大坝安全维护的实例，阐述了关于拟建大坝的关键问题和趋势。

关键词: 水力发电；大坝建设；大坝修复；大坝拆除；大坝安全；新建大坝

1 美国大坝的作用

水，在人类活动和自然演变中都起着十分重要的作用。水对所有人而言是最重要的物质，无论富有或是贫穷，无论生活在城市还是乡村，无论信奉宗教或者不信，无论保守或是思想解放，无论激进或是平和。虽然水是如此的重要，种种关于如何使用和控制水的观点却是大相径庭。水是生命的载体，它是人类社会和自然不断进步以及提高生存质量的必需品。从世界范围或者美国来看，水资源是极其丰富的，但其时空分布不均，由此造成的干旱和水灾都是危及社会和自然社会的灾害。保证安全可靠的供水是维持一个健康、繁荣的社会的关键所在。将已有的水资源按时间，或空间，或者按时空重新分布是大坝及其水库的主要作用。

在美国，大坝成为国家基础设施中的重要元素。然而，如下文所示，这些大坝中有许多已经老化。当前问题主要是如何维持其安全性，以及延长它们的使用寿命。为了满足某些特定需求，一些新的大坝也正在建设，其中不乏工程较大的工程。同时，一些老化或者失去功效的大坝，正在被拆除。

2 已有大坝、在建大坝及修复工程

2.1 已有大坝概况

根据国家大坝目录，美国现有大坝数目超过 82,000 座，其中 6,975 座大坝坝高超过 15m，1,749 座大坝坝高超过 30m，如图 1 所示。

这些大坝的建设时期如图 2 所示。

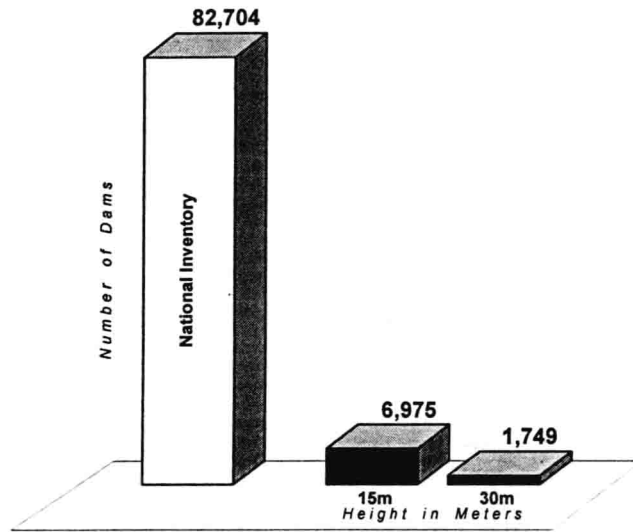


图 1 美国大坝数目统计图

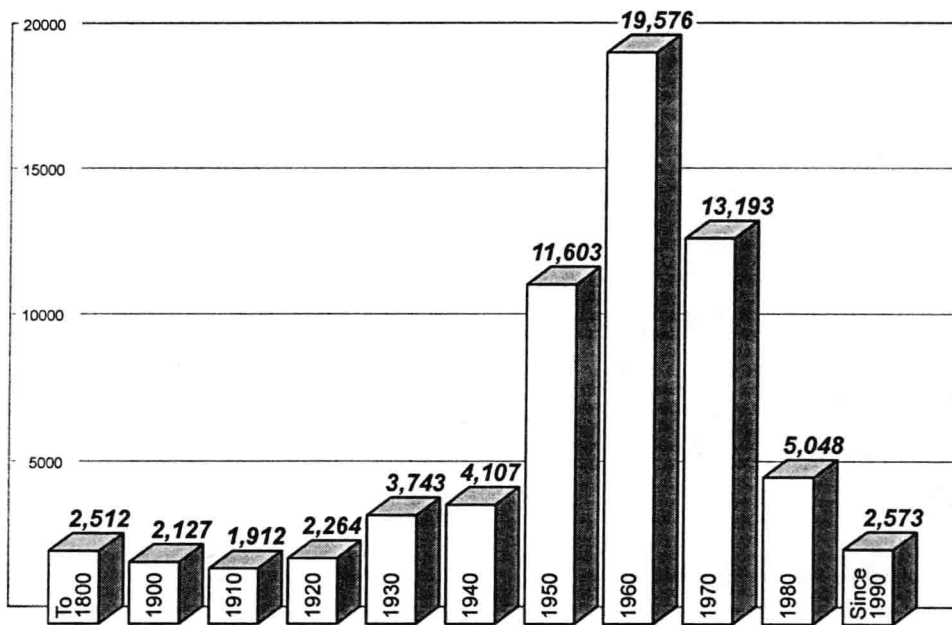


图 2 美国的大坝建设

显然，大坝正在逐渐老化。目前，25%以上的大坝工作年限超过 50 年，而 10 年后将有 50%以上的大坝服役年限超过 50 年（如图 3）。

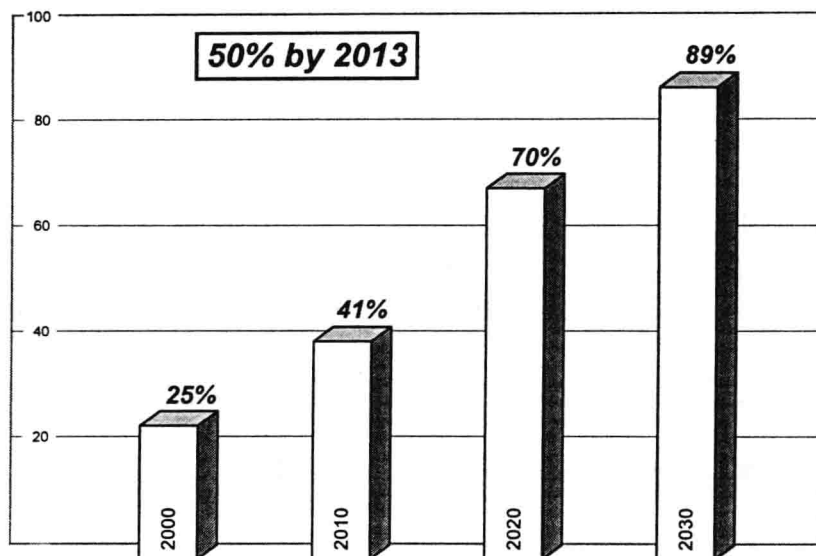


图 3 服务年限超过 50 年的大坝的比率

在美国，大坝的所有权由私人（拥有大坝 58% 的所有权）、当地政府、州政府和联邦政府持有，持有比例如图 4 所示。

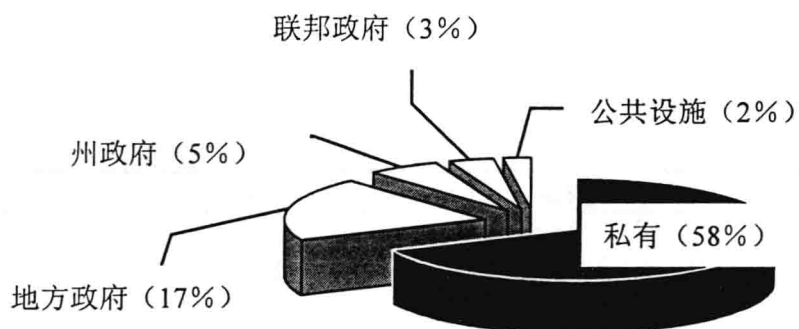


图 4 美国大坝所有权分配

这些大坝的主要功能包括旅游（以 33% 居首位），作为防火及灌溉池，防洪，灌溉，供水，尾矿和水力发电等，其分布比例如图 5 所示。

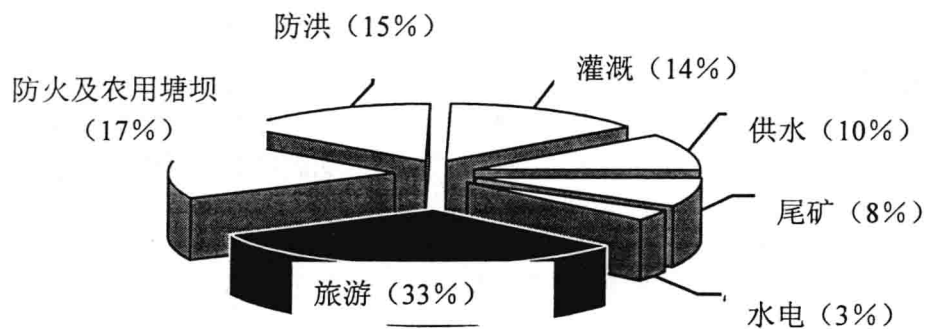


图 5 美国大坝功能分布

2.2 新建大坝

在最近 5 年内, 1999~2004, 有 53 座坝高超过 15m 的大坝在建或是建成, 其中包括高 193 m 的 Seven Oaks 坝, 坝高 97m 的 Olivenhain 坝, 87m 高的 Diamond Valley 坝, 34m 高的 Fortune 坝, 50m 高的 Trask River 坝和 48m 高的 Penn Forest 坝。

2.3 大坝的修复和更新

许多大坝在进行修复或是更新, 其主要目的在于:

- 提高坝顶高程以增加库容;
- 修复混凝土老化过程中的损伤, 例如冻融破坏、碱骨料反应引起的混凝土膨胀, 以及其它作用等;
- 改进安全标准以满足新的、更高的要求, 例如适应更高的可能最大洪水, 或者适应更大的最大可信地震;
- 对预先估计不足的潜在隐患作修补, 例如有液化危险的水力冲填坝或建在易液化基础上大坝;
- 加固溢洪道闸门, 尤其是弧形闸门及其枢轴。

这些修复更新工程的造价从几万美元到几亿美元不等。这些工作是美国对大坝的重要投入。

3 大坝的退役、拆除以及河流的恢复

3.1 概述

在美国, 随着有文献记载的 500 余座已老化大坝的拆除, 大坝拆除(退役)已被大家接受成为处理已丧失功能的大坝的措施。见表 1。

表 1 大坝的退役退役的大坝总数(从 1946 年至今): 467 座

州	数量	最大坝高 (m)	平均坝高 (m)
加利福尼亚	48	17.1	4.6
威斯康星	73	17.7	3.0
康涅狄格	16	7.9	3.4
俄亥俄州	38	12.2	5.8
宾夕法尼亚州	38	9.1	2.7
田纳西州	26	48.8*	14.3*
伊利诺斯州	17	29.3	7.9

*由矿业公司拥有和拆除

根据表 1, 退役的这些大坝大部分尺寸较小。

在许多情况下, 大坝的拆除能给社会和自然环境带来一定的益处。然而, 从河道上拆除一座大坝并不总是合适的解决办法。事实上, 在拆除工程中, 规划考虑不周会引起难以预料的严重后果。同时, 已有文献记载的资料也不足以证明“拆除大坝能增进河流生态系统健康”这一论断。

在过去的几十年里, 恢复河流形态和天然河道成为工程追逐的目标。在整个北美州有上百万美元的资金已投入, 或将要投入到河道恢复工程中去。这些工程都旨在使河流回复到未被干扰的天然状态。

然而, 在很多情况下, 这些工程目标并不总能达到, 这是因为:

- (1) 确定构成河流系统的所有的复杂的、动态的变量, 并将其恢复到自然状态几乎是不可能的。

(2) 在有些情况下，无法确定河流被干扰前的形态。

(3) 即使河流系统未被干扰时的形态能够确定，将其恢复到该状态也不一定是可行的。

通常，建立一个新的、自然的河流生态系统并尽可能保持系统的构成成分是人们喜闻乐见的。然而，在某些情况下，这些理想的构成成分可能和被干扰前的河流特征不相容。因此，术语“恢复”的定义应该包括通过可持续管理进行修复、增强和稳定等更广泛的含义。显然，为河流恢复工程确定一个可实现的目标对于成功实现河道恢复计划是极其重要的。

3.2 当前工作

在北美洲，大坝拆移一直处在激烈的争论中。一些激进的团体，例如美国河流组织，指出许多老的大坝，尤其是位于东部和中西部的一些小坝，已经超过了其经济使用年限，是该拆除了。联邦能源管理委员会(FERC)出台许可证补充条例，管制非联邦的发电大坝，利用这一浪潮，环境主义团体将这些大坝作为攻击的靶子。

服役 162 年的 Edwards 坝位于缅因州，其拆除为大西洋鲑、条纹石酯和鲟鱼提供了 27km 长的新产卵栖息地，是利益竞争双方消除分歧共同促成河流系统恢复的一个范例。在经过长达十年的激烈争论后，FERC 于 1997 年提出的最终研究结果表明，拆除该坝带来的环境效益远远超过了保留仅发出少量电的该坝的效益。此后进行了复杂的处理工作，涉及到的部门包括大坝的所有者、州政府、奥古斯塔市(缅因州首府)和其它该地区的工业用户。

一场激励的争论在美国西南部展开，讨论是否拆除四座位于 Lower Snake 河上的大坝以恢复该地区濒临破产的渔业。这 4 座水库，Lower Granite, Little Goose, Lower Monumental 以及 Ice Harbo，建于 20 世纪六七十年代，当时是为了获取廉价的电力、灌溉水以及从北美大平原通向太平洋的、运输粮食和木材的航道。在过去 10 年里，它们成为激烈争论的焦点。美国陆军工程师团对改善鱼类通过长达 140 英里 Lower Snake 河河段的两种方案进行了可行性研究，其中一个方案就是拆除位于这一河段的四座综合利用水库。研究的最终结果确定这几座大坝不应被拆除，这是因为：

- 当前恢复河道中的大马哈鱼和虹鳟，拆除大坝并不是必须的。
- 短期内河道中会出现较高的泥沙运移。
- 无法确定水库淤沙中沉积的污染物可能带来的不利影响。
- 拆除大坝会带来较大的负面经济影响。
- 拆除大坝需要较长实施时期。

推荐方案包括一系列结构上的、可操作的措施，使原有各项功能和过鱼能同时兼顾并达到最优。这些措施不仅能降低鱼通过这一河段的死亡率，还能通过减少水中溶解气体量来减小施加在鱼身上的压力，提高运行的可行性。使这一方案确立的关键因素包括：

- 幼年和成年大马哈鱼，以及虹鳟的过坝存活率高。
- 与 NMFS/USFWS 2000 的生态评估意见一致。
- 带来最小的经济影响。
- 对其他自然环境资源影响最小。

4 已建大坝的安全管理程序

4.1 责任

在美国，大坝安全的责任分别由下列部门分担：

- 联邦政府拥有的大坝由其管理机构管理，例如美国垦务局(USBR)，美国陆军工程师团，等。
- 非联邦政府所有的、和水力发电相关的大坝由联邦能源管理委员会(FERC)管理。

- 其它用于供水、灌溉等的大坝由各州负责，管理依据美国大坝安全管理协会 (ASDSO) 制定的导则进行。

4.2 当前概况

近些年，美国发生了一系列大坝失事事故，仅在 1999~2000 两年期间就有 70 例上报（见表 2）。根据表中统计数据，失事的坝大部分为较低的小坝。

表 2 大坝失事数目

大坝失事总数：70 座

坝高 (m)	数量
1-3	6
3-6	30
6-9	11
9-12	4
18-21	1
不祥	18

失事原因及失事大坝类型所占比例如图 6 所示。

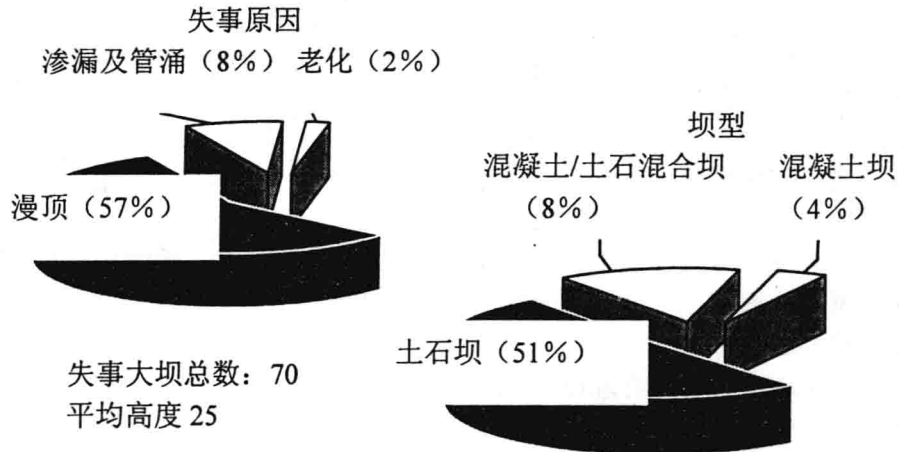


图 6 大坝失事原因

4.3 大坝安全程序

USBR 和美国陆军工程师团 (USACE) 拥有许多大坝，他们都有相应的大坝安全管理程序，包括基于监测的可能破坏模式分析和一些风险评估程序，用以确定大坝安全改造的优先次序。

各州管理着数量众多的所谓小坝。ASDSO 最近对需要进行安全修复的州辖大坝进行了调查统计，结果表明需要投入 362 亿美元的资金来完成这些修复工程。

联邦能源管理委员会 (FERC) 名下有许多大坝，并且多年以来一直按照安全管理程序运行。在程序执行过程当中，对于被认定有较大安全隐患的部位进行了各种修复。目前，FERC 引入了与 USBR 相似的、基于可能破坏模式分析的新安全管理程序，以下将进行详细阐述。

4.4 FERC 安全管理程序的研究方法

2003 年，联邦能源管理委员会 (FERC) 引入了大坝安全状态监控程序 (DSPMP)，作为对其治下大坝进行安全管理的基本手段。该程序的介绍可从 FERC 官方网站的“大坝安全指南”中获取。(<http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/dspmp.asp>)。

FERC 声明：

“创新的方法产生更有效的辅助工具，大坝所有者、工程师、管理者可以应用这些工具对大坝进行适当的监测、评估和安全维护。

在潜在安全隐患发展的部位，如果没能进行适当的监测和修复，这些方法能够（1）尽可能确定需要检查但被忽略的可能破坏模式；（2）确定如果按现今水平设计大坝是否需要其它附加参数。

因此，FERC 将大坝安全程序向着功能更完善全面的‘大坝安全状态监控程序’转变的时机到了。这样，可以确保大坝的可能破坏模式得到尽可能准确的确定。

这将减轻对不能被传统方法检测到的、但可能存在安全隐患的部位的担忧。”

在 FERC 推荐的程序和标准的指导下，新的方法被提了出来，即建立基于破坏模式思想的状态监控程序以协助 FERC 对水利工程的工作状况进行评估。这一程序包括：

- 可能破坏模式分析(PFMA)；
- 大坝安全状态监控程序的开发(DSPMP)。

可能破坏模式分析（PFMA）是由专家、独立顾问工程师和 FERC 工作人员共同推导的。

DSPMP 是在 PFMA 的基础上进行研发的，其主体部分整合了专业的运行、维护和检修程序在内。

独立顾问工程师的监测和报告以及 FERC 的检查程序也将使用 PFMA 和 DSPMP 进行。

将可能破坏模式分析整合到状态监控程序中去，使得大坝安全程序的效率大大提高了。通过从 PFMA 获得的知识、观点和理解，PMP 的执行将变得更加有效。由此增加的大坝安全方面的价值包括：

- 明确了纠正、澄清或补充对可能破坏模式及其假设的理解的数据及信息；
- 确定最可能出现的破坏模式；
- 确定了风险降低的几率；
- 统一使用监控仪器和监控程序获得可能破坏模式的信息，由此给出大坝安全最薄弱部位；
- 开发了一种操作程序以确保运行过程中不出现导致误操作的薄弱环节；
- 提高了工程人员、运行人员对大坝安全、大坝监测及其重要性的理解。

虽然大坝都强调进行例行的安全监测，规章制度特别声明：所有工程，除输变电设施及发电装置之外，都应该由独立顾问工程师进行检查。另外，某些其它水工结构，例如渠道、渡槽、隧洞和压力钢管等，如果失事可能影响到公众安全。因此，这些类型的工程同样要确保进行可能破坏模式的研究、这些规程涉及到所有失事后危及公众安全的大坝和工程。

5 关键问题和趋势

5.1 效益、关注的问题、造价及决策

通常认为：

- (1) 综合利用大坝及水库在国家尚处在发展中阶段时能产生显著效益
- (2) 取得效益的代价包括：
 - 自然生态环境
 - 利益分配不公平
 - 移民
 - 工程功能不完全与社会需求相一致
- (3) 由于未进行足够的规划，许多工程投资的利用效率不很理想
- (4) 业主必须确保新工程在经过详尽的规划后再投入建设
- (5) 工程规划应该在整个流域的基础上展开

5.2 新建大坝的规划——USSD 的意见书

为了促进社会对大坝作用的理解，USSD 对公众争论做出反应，于近期发表了“意见书”，概括了美国新建大坝的规划和通过审批所应经历的程序（USSD, 2003）。该过程包括对可替代方案和持股者利益的详尽的、公开化的论证。下面给出了该文的主要选段：

“大坝和水库的发展需要投入大量的公共资源，其中既包括了资金也包括自然资源。正因为此，我们需要在公正、高效、负责、公开的基础上做出英明的决策和成功的工程规划。为满足社会需求来实现工程的功能远比为了建造一个工程而建工程来得重要。工程的项目负责人应该担负起责任，保证公共资源的有效利用和利益在受益方和受损方之间公平分配。工程建设必须以达到与资源的可持续利用、发展相平衡为基础开展。

一个成功的工程能够通过维护和改造来适应未来社会的挑战。此处阐述的决策制定过程可以拿来与最可能成功的计划的决策过程进行比较。当几个团体中的任何一个即可否定一项工程，而通常仅有一个团体能够获得该工程的实施权时，这样一个决策制定过程显得尤为必要。成功的决策制定是一个反复迭代的过程，每次迭代完成都使候选方案数目减少。随着每次迭代和候选方案数的减少，在工程描述和备选方案评估方面的细节在不断增加。”

“成功的大坝和水库建设需要一套建立在公正、高效、负责、公开的基础上的决策制定和工程和规划程序。本白皮书中阐述的方法需要建立备选方案的发展和筛选过程，这一过程在使用对工程需求和目标做出的精确陈述的基础上来达到上述要求，而陈述在方案筛选过程的发展和实施中充分考虑了直接相关的公众的利益。这一规划阶段的决策制定过程旨在有效确定既满足工程目标又能有效利用公众投资的工程备选方案。在该过程中，担负的责任和公众参与使得决策是可行的、可持续的。在备选方案筛选过程中采用的标准为工程实施获取的利益和所需的投资的担保提供了框架。这一过程支持公共资源在大坝和水库建设中的可持续发展。目前，该过程已经在政府机构承建的水库大坝工程中成功实施，而此前决策最终制定前需要通过上级决策者的审批，其中需要考虑工程对机构财政费率的影响并获得纳税人的支持。”

这样一个过程已经用在已于近期完工并获得极大成功的 Olivenhain 水库工程（位于加利福尼亚州）的决策和实施过程中。该工程的成功阐明了一个重大工程如何通过合适的程序在社会环境复杂的地区实施，成为美国后续工程的范例。

6 关于美国大坝建设和维护的一般性结论

随着筑坝史的延长和社会需求的不断变化，坝工结构日趋成熟。同时，对大坝进行修复和改造的频率也在加快。当前建设的重点在于维持和拓延大坝的使用寿命，并加以改造以适应日益增长的、来自安全和环境方面更高标准的要求。

目前，美国仍有新的大坝正在建设当中。这些坝是在新的、更广泛的论证和管理程序下进行规划和建筑的。

显然，大坝在美国的社会、经济和环境等领域中起着至关重要的作用，而且将会继续发挥它们的作用。

致谢

感谢我在美国大坝学会（USSD）和 Acres International（Acres）的同事帮助我搜集大坝建设方面的资料。尤其感谢 USSD 成员 Art Walz, Ron Corso, Bill Bingham 和 Ken Steele, 以及 Acres 的 Rick Donnelly 和 Ross Zhou 给我提出的建议，给了我很多帮助。

中国混凝土面板堆石坝的近期进展

蒋国澄¹, 赵增凯²

1, 中国水利水电科学研究院;

2, 水利部水利水电规划设计总院

摘要: 中国自 19 世纪 80 年代中期开始用现代技术修建混凝土面板堆石坝, 到 2003 年底已建成和在建的已超过 110 座, 其中坝高超过 100m 的有 31 座。本文介绍近年来混凝土面板堆石坝建设的若干新进展。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 混凝土面板; 堆石坝

1 前言

中国用现代技术修建混凝土面板堆石坝始于 19 世纪 80 年代中期, 并在全国得到很快的发展。到 2003 年底, 已建成和在建的混凝土面板堆石坝达 110 座以上, 其中坝高超过 100m 的达 31 座。已建成最高的是高 178m 的天生桥一级水电站大坝, 在建最高的是高 233m 的水布垭水电站大坝。中国坝高 100m 以上已建和在建混凝土面板堆石坝的特性指标列于表 1。

在中国混凝土面板堆石坝发展过程中, 中国工程师们紧密跟踪国内外设计施工技术方面的最新经验, 同时也研发了若干新的工艺和技术, 如: 坝体分区和填方压实控制; 软岩用作筑坝材料; 混凝土面板裂缝控制和处理; 趾板的布置和设计; 流向上游坡面的反向渗水的处理; 趾板直接建置于砂砾石覆盖层上并用混凝土防渗墙作为坝基渗流控制措施; 修建坝顶溢洪道; 用高混凝土挡墙改造不利地形条件; 用碾压砂浆、乳化沥青及挤压混凝土作为上游坡施工期保护措施; 在未完成堆石坝面过水渡汛; 用 GPS 系统监测压实层厚度和碾压机具运行轨迹; 堆石料的压实新方法等。有些技术成果曾在以前介绍过 (1、2), 本文将进一步介绍近年来取得的一些新经验。

2 面板裂缝的防治

混凝土面板可能发生两类裂缝, 即由坝体不均匀变形引起的结构性裂缝及由混凝土本身干缩和温降引起的收缩裂缝。这两类裂缝的发生机理和防治措施也是不同的。

2.1 结构性裂缝

世界上两座最高的混凝土面板堆石坝, 即 187m 高的 Aguamilpa 坝和高 178m 的天生桥一级坝, 都曾发生过因坝体不均匀变形而引起的结构性裂缝, 在面板上部发生了严重裂缝 (3, 4)。根据这些高坝的经验教训, 可以总结出一些有益于防止结构性裂缝的措施。

(1) 改进主堆石和下游堆石的分区。早期经验认为下游堆石的变形对面板性状没有影响, 这是不正确的。主堆石与下游堆石间的大量不均匀变形将在面板内形成较大拉应力, 成为引起面板裂缝的重要因素之一。因此近期修建的坝高 120m 以上, 特别是 150m 以上的高坝, 都对此给予了更多的注意。包括尽可能扩大主堆石区范围; 将主堆石及下游堆石区的界线设置成自坝轴线向下游倾的线, 其坡度最好达到 1: 0.5 等。在有一些坝址, 主堆石及下游

堆石用的是同一料源和同一岩性的材料，将这两区合成一区，采用同一填筑标准，是较好的解决方法。上述原则已在许多中国的混凝土面板堆石坝中得到应用。

表 1 中国的混凝土面板堆石坝（坝高大于 100m）

序号	坝名	位置	河流	坝高 m	坝体积 10^6m^3	面板 面积 10^3m^2	库容 10^6m^3	装机容量 MW	泄水量 m^3/s	完成 年份
1	水布垭	湖北	清江	233	15.26	138.4	4580	1600	18249	在建
2	三板溪	贵州	清水江	185	9.61	94.1	4090	1000		在建
3	洪家渡	贵州	六冲河	179	9.00	75.1	4590	600	6996	在建
4	天生桥 一级	广西 贵州	南盘江	178	18.00	173.0	10257	1200	21750	2000
5	滩坑	浙江	小溪	162	9.80	95.0	4190	600		在建
6	紫坪铺	四川	岷江	156	11.80	132.0	1080	760	7008	在建
7	吉林台	新疆	喀什河	152	9.20	74.0	2440	460	1753	在建
8	龙首二级	青海	黑河	146	2.53	26.4	86	157	2629	在建
9	公伯峡	青海	黄河	139	4.98	61.2	692	1500	7500	在建
10	瓦屋山	四川	青衣江	139	3.50	20.0	550	240		在建
11	珊溪	浙江	飞云江	132	5.89	68.8	1842	200	8429	2001
12	乌鲁瓦提	新疆	喀拉 喀什河	132	6.06	72.2	347	60	1890	2000
13	引子渡	贵州	三岔河	129	2.82	29.6	531	360	8251	2002
14	街面	福建	尤溪	129	3.40	30.0	1824	300		在建
15	白溪	浙江	白溪	124	3.90	48.0	168	18		2001
16	黑泉	青海	宝库河	123	5.40	79.0	182	12	389	2000
17	芹山	福建	穆阳溪	122	2.48	42.0	265	70	3315	1999
18	白云	湖南	巫水	120	1.70	14.5	360	54	2150	1998
19	古洞口	湖北	古夫河	117	1.90	28.1	138	36	4785	1999
20	芭蕉河	湖北	芭蕉河	115	1.92	36.0	99	34		在建
21	泗南江	云南	泗南江	115	2.97		263	200		在建
22	高塘	广东	白水河	111	1.95	26.4	96	36		2000
23	双沟	吉林	松江河	110	2.58	37.3	390	280		在建
24	那兰	云南	藤条江	109	2.59	40.8	286	150		在建
25	茄子山	云南	苏帕河	106	1.40	22.0	121	16	730	2000
26	鱼跳	重庆	大溪河	106	1.95	18.8	95	48	3960	2001
27	洞巴	广西	西洋江	105	3.16	52.7	315	72		在建
28	思安江	广西	思安江	103	2.10	41.2	94	12		在建
29	盘石头	河南	淇河	102	5.10	60.8	608	10		在建
30	柴石滩	云南	南盘江	102	2.17	38.2	437	60	3336	2000
31	白水坑	浙江	红山港	101	1.60	24.6	246	40		2003

- (2) 提高堆石填方的压实密度 尽可能提高压实密度及变形模量可以大大减少坝体的变形及不均匀沉降。这可以用重型压实机具达到此种目的，如 25t 的自行式振动碾，或 20t 牵引式振动碾等机具。在中国的混凝土面板堆石坝设计规范（5）中，曾建议了堆石压实后的孔

隙率标准,但这是根据以前 100m 级的面板坝的经验归纳出来的,不适应更高的、200m 级的面板坝。进一步提高压实密度或降低孔隙率是可能和必要的。在工程上,天生桥一级坝,高 178m,其垫层及主堆石的压实孔隙率分别为 19% 及 22%,坝体发生了较大变形,沉降达坝高的 2% 以上。此后各坝都提高了填料的压实标准。如:水布垭、洪家渡、引子渡、芹山、珊溪、白溪等坝的垫层和主堆石的压实孔隙率分别为 17% 及 19.6%、19% 及 20%、18% 及 20%、15.4 及 19.8%、18% 及 19%、14.8 及 19.7%。下游堆石区的压实标准不能比主堆石区低得太多,以减小下游堆石区及主堆石区之间的变形模量之差。

- (3) 坝体填方全断面均衡上升 近年来重视了坝体全断面均衡上升,以减少坝体各部分之间的不均匀变形,而这种不均匀变形正是面板结构性裂缝的可能原因。有时为了抢截流后第一年的度汛高程,不得不迅速填筑上游临时断面,但上下游填方的高差应予以限制,如不超过 20~30m。必要时下游填方还可以分为两个台阶。高 139m 的公伯峡面板坝做到了全断面均衡上升,而 132m 高的珊溪面板坝则是第一个汛期用临时断面挡水,以后保持全断面上升,效果都不错。
- (4) 面板浇筑前使坝体有一预沉降期 由于后期沉降对面板结构性裂缝有重要影响,因此在坝体填筑到面板浇筑高程时,间歇一段时间,使坝体在浇筑面板前预先发生一定的沉降,以减少面板浇筑后的沉降,对避免面板结构性裂缝有很大作用。如能使已完成的坝体经过一个汛期则更好,降雨可使堆石体湿润而发生更多沉降。这一段时间可称之为预沉降期,对减少后期沉降和面板结构性裂缝极为有效。

2.2 面板的收缩裂缝

另一类面板裂缝是由混凝土因干燥和温降而导致的自身体积收缩所引起。这类裂缝的防治是一项系统工程,包括面板混凝土配比的优化,浇筑混凝土的质量控制,已浇筑混凝土的养护,减少作用在面板上的约束力等。改善混凝土的级配对防止裂缝、提高耐久性和施工和易性都是很重要的。中国在优化混凝土配比方面,特别是各种外加剂和掺合料,做了大量工作。

- (1) 使用粉煤灰和复合外加剂 这是混凝土配比设计中最基本的方案。掺加胶凝材料 30% 的粉煤灰可以替代部分水泥,并改善砂子级配。复合外加剂的成分主要是高效减水剂及引气剂,必要时也可加入调凝剂。例如万安溪面板坝的面板混凝土用了 19% 及 30% 的粉煤灰及三复合外加剂,包括高效减水剂 FE、引气剂 DH9 及木钙缓凝剂,可以减水 20%,含气量达 4%~5%,和易性也很好。施工期和运行期都没有发现裂缝,只是在岸坡附近因地形影响而在运行期出现很少几条小裂缝。
- (2) 微膨胀剂(防裂剂) 有一些混凝土面板堆石坝在掺加减水剂和引气剂的同时,还使用了不同品种的微膨胀剂,使混凝土具有微膨胀性,以补偿混凝土面板的收缩,从而消除或减少其裂缝。珊溪混凝土面板堆石坝,高 132.5m,即为使用微膨胀剂的一个成功实例。珊溪面板混凝土中除掺加优质粉煤灰、减水剂 NMR 及引气剂 BLY 之外,还掺加了防裂剂 VF-II。混凝土表现出良好的耐久性、不透水性、抗冻性及施工和易性。同时,混凝土面板的微膨胀补偿了因干燥和温降引起的收缩,并有效地防止收缩裂缝的发生。珊溪工程面板面积为 68800m²,在施工期及运行期都没有发现裂缝。这一经验已推广到 12 座面板坝,如梅溪,高 40m;港口湾,高 68m;盘石头,高 102m 等。
- (3) 纤维混凝土 曾研究过用掺加钢纤维及合成材料纤维的方法提高面板混凝土的防裂能力,但实际上只有合成材料纤维曾用于实际工程。124m 高的白溪面板坝在第二期面板混凝土中掺加了聚丙烯纤维,是国内首次应用。除粉煤灰、减水剂及引气剂外,还掺加了 0.1% (即 0.9kg/m³) 聚丙烯纤维,以进一步提高其防裂性能。掺加聚丙烯纤维可以有效地防止早期裂缝,减小其弹性模量,并增加其极限拉伸。在 33 块面板上只发现 4 条宽度大于 0.2mm 的裂缝。此后洪家渡、引子渡等工程也成功地应用了聚丙烯纤维混凝土。

- (4) 高性能混凝土 榆树沟混凝土面板堆石坝坝高 67.5m, 于 2002 年建成, 是一座坝顶溢洪道式的面板坝。其面板混凝土采用了一种基于高性能混凝土原理的配比设计, 使其具有高强度、高耐久性及高和易性。在混凝土配比中除一般混凝土组分外, 还含有 30%~40% 的磨细高炉矿渣, 施工期采取的试样的试验成果表明其平均强度为 51.1MPa, 不透水性等级大于 W10, 抗冻等级大于 F200。面板上只有一些细小裂缝, 其总长度约 100m, 宽度小于 0.2mm, 深度小于 1~3cm。在其他面板坝上还使用过优质粉煤灰及硅粉作为面板高性能混凝土的掺合料。这些经验对解决面板混凝土防裂问题, 特别对寒冷地区的面板坝, 是有价值的。

3 趾板建基于砂砾石覆盖层上

中国有不少混凝土面板堆石坝建于砂砾石覆盖层上, 其地基处理方式有三种方案: 将覆盖层全部挖除; 趾板建基于基岩上, 而坝体建基于覆盖层上; 趾板建基于覆盖层上, 而以混凝土防渗墙作地基的防渗处理, 并以连接板将防渗墙与趾板连接。

中国有 100 座以上的土石坝建于砂砾石覆盖层上, 并以混凝土防渗墙作地基防渗处理。首次用于面板坝的是柯柯亚坝, 高 41.5m, 覆盖层深 27.5m, 于 1986 年建成。至今采用这种方案的混凝土面板堆石坝已建成的有 11 座, 在建的有 3 座。已建和在建的坝高分别为 70m 和 108m。1992 年建成的横山水库加高工程的混凝土防渗墙深度达 72.3m, 是同类工程中最深的一座。一般一道 80cm 厚的混凝土防渗墙对渗流控制而言是足够了。连接板用于将防渗墙与趾板连接起来, 形成一个完整的防渗体系。防渗墙、连接板及趾板间的接缝按周边缝处理, 以适应不同部分之间的不均匀沉降。

基于 11 座已建成趾板建于覆盖层上混凝土面板堆石坝的成功经验, 在 2003 年开始建设 3 座这种形式的高坝, 即: 那兰坝, 高 108.7m, 覆盖层深 18m; 老渡口坝, 坝高 95m, 覆盖层深 30m; 及察汗乌苏坝, 高 107.6m, 覆盖层深 46.7m。

4 高挡墙改造不利地形条件

以前曾报道过小干沟面板坝曾使用高混凝土挡墙改造不利地形(1)。小干沟水库在 1991 年首次蓄水, 并正常运行至今。其渗流量仅小于 3L/s, 且有随时间而减少的趋势。这种处理方案曾用材料试验、三维有限元分析及土工离心模型试验等手段进行过详细研究, 并在实践中予以验证, 被证明为这类问题的有效措施, 已成为混凝土面板堆石坝的一种常规设计。

龙首二级混凝土面板堆石坝, 高 146.5m, 坝址地形条件与小干沟工程有些相似, 也座落在河流的弯道上。在上游面采用高混凝土挡墙作为高趾墙, 与混凝土面板相连接, 技术方案与小干沟是类似的。其最大墙高为 39.8m, 墙的长度为 40.8m。挡墙为重力式, 其上下游边坡分别为 1: 0.5 及 1: 0.1。根据常规计算, 断面布置满足规范规定的稳定和应力的要求。用三维非线性有限元静动力应力应变分析及土工离心模型试验作了进一步研究, 表明这一方案是安全和合理的。该水库已于 2003 年开始蓄水。

采用高挡墙的另一个工程是 139m 高的施工中的公伯峡混凝土面板堆石坝。挡墙的最大高度为 50m, 长度为 85m, 位于右岸, 用作面板坝的高趾墙及水电站引水渠的边墙。重力式挡墙用材料力学方法设计, 三维非线性有限元分析校核。挡墙的上下游边坡分别为铅垂及 1: 0.6。工程预计在 2004 年蓄水。

龙首二级及公伯峡混凝土面板堆石坝都位于强地震区, 设计地震烈度都是Ⅷ度, 曾进行相应的抗震分析以评估其动力稳定性, 并采取抗震措施。