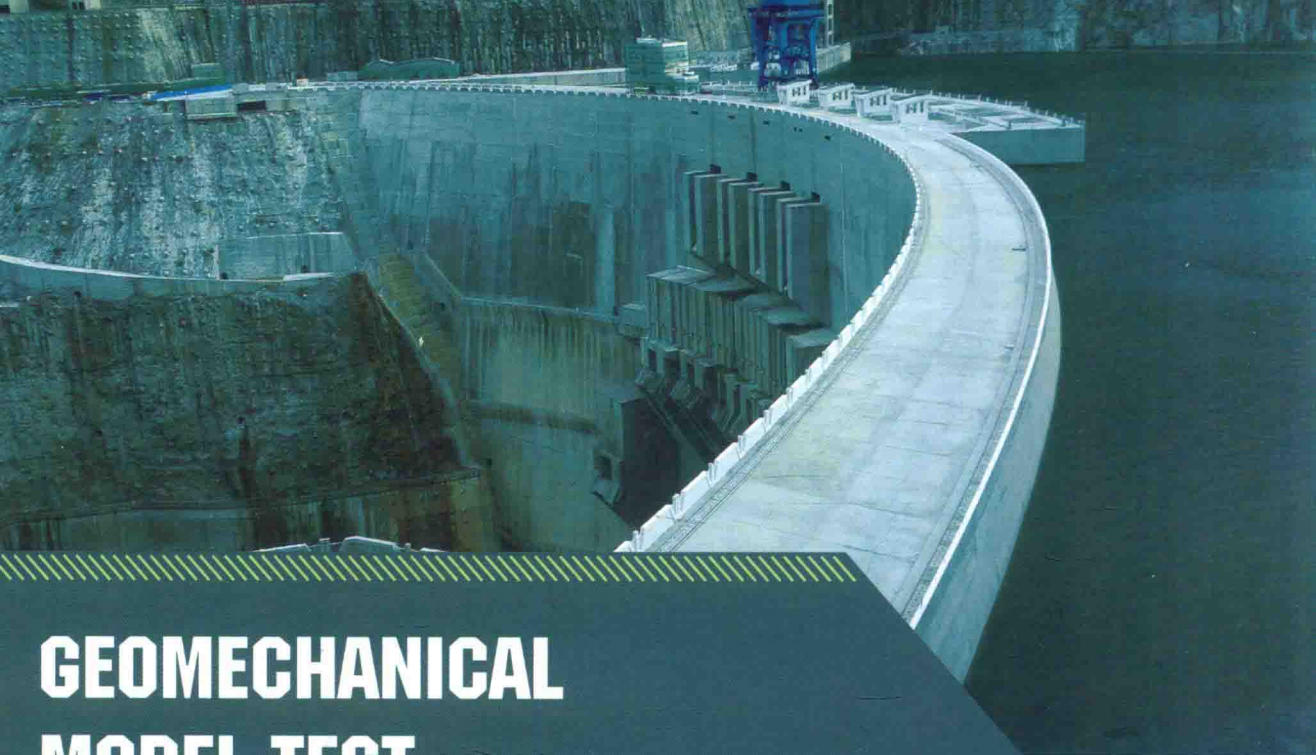




**GEOMECHANICAL
MODEL TEST
FOR HIGH ARCH DAM**

高拱坝地质力学模型试验

刘耀儒 杨强 杨若琼 周维垣 著

清华大学出版社

**GEOMECHANICAL MODEL TEST
FOR HIGH ARCH DAM**

高拱坝地质力学模型试验

刘耀儒 杨 强 杨若琼 周维垣 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近些年来在高拱坝地质力学模型试验相关的各方面的最新研究成果及其在国内高拱坝工程中的应用。本书主要针对模型试验相似材料、模型砌筑技术、试验设备、加载系统、数据测量以及基于地质力学模型试验的高拱坝整体稳定和加固评价理论方法进行了叙述,具有很强的理论和实际指导意义。本书还对溪洛渡、白鹤滩、大岗山和小湾等高拱坝的地质力学模型试验进行了详细介绍,从破坏模式、加固效果评价及坝内裂缝对拱坝的影响等方面进行了全面分析,阐述了采用地质力学模型试验进行高拱坝稳定和加固的分析和评价方法。

本书注重理论、方法、技术与工程应用的紧密结合,提出的地质力学模型试验方法在国内大部分高拱坝中得到成功应用,获得的研究成果有效地指导了国内高拱坝的稳定分析和加固设计。

本书可供从事水电工程领域的设计、科研和试验技术人员使用,可以给交通、采矿和能源等其他与岩体结构相关的专业人员提供有益帮助,也可以作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高拱坝地质力学模型试验/刘耀儒等著. --北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-39305-4

I. ①高… II. ①刘… III. ①高坝—拱坝—地质力学—水工模型试验 IV. ①TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024915 号

责任编辑:张占奎

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12 字 数:291 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

产品编号:058473-01

随着我国国民经济的快速发展,西南、西北等地区的水利水电建设取得了蓬勃发展。一大批高拱坝,例如溪洛渡(285.5m)、小湾(292.5m)、锦屏(305m)、大岗山(210m)等已经接近完工,另外一些高拱坝,例如白鹤滩(287m)、松塔(313m)、马吉(290m)等处于设计之中。这些高拱坝无一例外都处在河谷陡峻、高地应力的复杂地形地质赋存环境中,对高拱坝工程的安全有着巨大的影响。

高拱坝的安全性主要受大坝基岩控制,坝肩稳定是其安全的核心问题。伴随着岩石力学理论和计算技术的发展,拱坝设计水平得到了很大的发展。稳定分析和加固设计也取得了很大的进展。但是由于高拱坝赋存的地质环境的复杂性,传统的理论解析方法难以处理岩体的非线性特征,飞速发展的数值模拟技术在岩体裂隙模拟及破坏仿真方面,也具有自身的局限性。而地质力学模型试验,以其直观、形象和岩体模拟的真实性成为高拱坝整体作用机理、破坏分析和加固设计的重要手段。尤其是对于我国的300m级高拱坝,更需要通过地质力学模型试验,深入研究其破坏模式,对其进行有针对性的加固设计,以保证大坝的安全可靠运行。

清华大学水利系水工结构实验室在1956年开始进行拱坝的地质力学模型试验研究,是国内最早开展拱坝地质力学模型试验的单位。先后完成了青石岭、龙羊峡、李家峡、东风、紧水滩、二滩、铜头、拉西瓦、大岗山、锦屏一级、溪洛渡、小湾、白鹤滩等高拱坝的地质力学模型试验研究,为这些高拱坝的稳定分析和加固设计提供了科学依据。相关加固设计建议也已经成功应用到工程实践中。地质力学模型试验的相关创新性研究成果也获得了国家科技进步二等奖。同时,也编入了我国的水利行业标准《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)和电力行业标准《混凝土拱坝设计规范》(DL/T 5436—2006),以及2011年修订的《水工设计手册》(第5卷混凝土坝)中。

本书共分10章。第1章为绪论,介绍了高拱坝地质力学模型试验及发展现状;第2章介绍了地质力学模型试验的理论基础——相似理论;第3章介绍了地质力学模型试验相似材料的研制及模型加工技术的开发,重点阐述了能较好同时模拟岩体结构变形和强度特点的小块体砌筑技术;第4章针对模型试验装置和加载系统,阐述了模型试验台和多点伺服加载设备的研制;第5章阐述了数据采集和破坏监测,介绍了小尺寸、低成本的内部位移计和外部位移计的研制;第6章介绍了基于地质力学模型试验的高拱坝稳定评价理论,提出了整体稳定性的评价指标,并分析了拱坝位移分布与整体稳定性的关系;第7~10章分别介绍了溪洛渡、大岗山、白鹤滩和小湾等4个典型高拱坝的地质模型试验情况,其中第7章重点阐述了溪洛渡拱坝的破坏模式及内在成因;第8章重点介绍了大岗山拱坝的加固效果

评价;第9章重点介绍了白鹤滩这一典型不对称高拱坝的模型试验及与数值模拟的对比研究;第10章介绍了坝体内部存在裂缝的高拱坝的地质力学模型试验情况。

本书的研究成果和出版得到国家自然科学基金面上项目(51479097、51279086)、水沙科学与水利水电工程国家重点实验室科研项目(2013-KY-2)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0323)的资助,作者在此深表谢意!

本书是清华大学水利系水工结构实验室近十年在地质力学模型试验方面的理论研究和工程实践的总结,包含了试验技术和高拱坝稳定分析理论方面的研究成果。参加本书研究工作的还有沈大利、张泷、何柱、程立、武哲书、潘元炜、常强、邓检强、吕庆超、宋子亨、吕征、林聪、官福海、王峻、李波、崔智雄、冷旷代等。本书的研究成果也得到了中国水电顾问集团所属的多个勘测设计研究院的大力支持和帮助,在此一并致谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015年12月于清华园

第 1 章 绪论	1
1.1 地质力学模型试验的意义	1
1.1.1 地质力学模型试验	1
1.1.2 工程背景	1
1.1.3 地质力学模型试验的必要性	2
1.2 地质力学模型试验的研究现状	2
1.2.1 地质力学模型试验的发展	2
1.2.2 高拱坝地质力学模型试验研究进展	3
1.3 地质力学模型试验的发展趋势	5
参考文献	6
第 2 章 地质力学模型试验的相似理论	7
2.1 相似理论基础	7
2.1.1 基本概念	7
2.1.2 量纲分析	8
2.1.3 相似第一定理	8
2.1.4 相似第二定理	9
2.1.5 相似第三定理	9
2.2 相似关系分析和结构模型分类	9
2.2.1 方程分析法	10
2.2.2 量纲分析法	10
2.2.3 定律分析法	10
2.2.4 相似模型	10
2.3 地质力学模型试验的相似条件	11
2.3.1 相似比尺	12
2.3.2 静力结构模型的相似判据	12
2.4 考虑时效的模型试验相似理论	13
2.5 小结	14
参考文献	14

第3章 地质力学模型试验相似材料及模型加工技术	15
3.1 模型试验材料	15
3.1.1 模型试验材料特性	15
3.1.2 模型试验材料分类	16
3.1.3 材料试验和配比确定	18
3.2 小块体砌筑技术	22
3.2.1 小块体砌筑技术简介	22
3.2.2 小块体制作	22
3.2.3 坝拱坝体砌筑和雕琢	24
3.2.4 裂隙岩体模拟	26
3.2.5 断层、破碎带模拟	27
3.3 基础处理措施模拟技术	30
3.3.1 建基面混凝土置换	30
3.3.2 深部混凝土置换	31
3.3.3 大坝贴角模拟	33
3.3.4 预应力锚索模拟	34
3.4 小结	37
参考文献	37
第4章 模型试验装置和加载系统	40
4.1 模型试验装置	40
4.1.1 基座式试验槽	41
4.1.2 钢架式试验槽	42
4.1.3 新型多功能模型试验平台	42
4.1.4 其他新型模型试验平台	44
4.2 模型荷载模拟	46
4.2.1 重力荷载	46
4.2.2 静水荷载	47
4.2.3 联合的合成荷载模拟	50
4.2.4 渗透压力模拟	51
4.2.5 地应力荷载模拟	52
4.2.6 洞室内压	53
4.3 拱坝水压力模型荷载计算	54
4.3.1 基本参数	55
4.3.2 每层单位宽度内的集中力计算	55
4.3.3 集中力垂直作用位置	56
4.3.4 集中力的水平坐标位置和大小	57
4.4 模型加载设备	58
4.4.1 手工油泵千斤顶加载	58

4.4.2 多点伺服加载系统	58
4.5 小结	65
参考文献	65
第5章 数据采集和监测	67
5.1 应变测量原理	67
5.1.1 测量原理	67
5.1.2 线路分析	68
5.1.3 温度补偿	70
5.1.4 桥路	70
5.1.5 光纤测量	71
5.2 数据采集	72
5.2.1 应变测量及应力计算	72
5.2.2 位移测量方式	74
5.2.3 绝对位移的测量	76
5.2.4 相对位移的测量	76
5.2.5 温度测量	77
5.3 破坏监测	77
5.3.1 摄像头监测	77
5.3.2 声发射	78
5.4 数据处理和结果分析	79
5.4.1 测量结果的误差分析	79
5.4.2 统计分析	80
5.4.3 试验精度的影响因素	81
5.5 小结	82
参考文献	82
第6章 基于地质力学模型试验的高拱坝稳定评价分析	83
6.1 整体稳定的评价准则	83
6.2 基于地质力学模型试验的国内高拱坝安全稳定评价	85
6.3 试验位移分布与整体稳定性的关系	86
6.3.1 大岗山拱坝模型试验整体安全度	87
6.3.2 拱梁及坝周顺河向位移分析	87
6.3.3 拱坝位移方向角分析	90
参考文献	96
第7章 溪洛渡拱坝地质力学模型试验及破坏模式分析	98
7.1 概述	98
7.2 地质力学模型试验	99

7.2.1	模型砌筑	99
7.2.2	加载布置	101
7.2.3	测点布置	102
7.2.4	数据采集系统和破坏监控系统	103
7.3	试验结果分析	103
7.3.1	坝体位移分布	103
7.3.2	坝体应力分布	104
7.3.3	坝肩岩体变形分布	105
7.3.4	层间层内错动带相对位移分布规律	106
7.3.5	破坏形态及机理	106
7.3.6	整体安全度和破坏分析评价	110
7.4	试验主要结论	110
	参考文献	111
第8章	基于地质力学模型试验的大岗山拱坝加固效果分析	112
8.1	工程概况	112
8.2	地质力学模型试验	113
8.2.1	模型试验设计	113
8.2.2	坝基裂隙岩体模拟	114
8.2.3	断层模拟	115
8.2.4	基础加固模拟	115
8.2.5	加载及量测系统	116
8.3	试验结果分析	118
8.3.1	坝体位移分析	118
8.3.2	应力分析	119
8.3.3	超载位移分析	120
8.3.4	开裂破坏过程分析	121
8.3.5	整体稳定评价	121
8.4	加固措施影响评价	122
8.4.1	应力影响	122
8.4.2	变形影响	123
8.4.3	超载破坏模式影响	125
8.4.4	整体稳定性影响	127
8.5	与数值模拟的对比	128
8.5.1	位移对比	128
8.5.2	应力对比	128
8.5.3	开裂破坏对比分析	130
8.5.4	加固措施效果对比	134
8.5.5	整体稳定	135

8.6 试验主要结论	136
参考文献	136
第9章 不对称拱坝地质力学模型试验及与数值模拟的对比	137
9.1 工程概况	137
9.2 地质力学模型试验	138
9.2.1 相似比参数选择	138
9.2.2 模型模拟范围	138
9.2.3 测点布置	138
9.3 试验结果分析	140
9.3.1 坝体位移分析	140
9.3.2 正常水载下坝体的应力分布	141
9.3.3 坝体超载变形及开裂	142
9.3.4 岩基变形及破坏机制	147
9.3.5 各平切高程的开裂和破坏结果分析	152
9.3.6 坝踵和坝趾开裂	158
9.3.7 坝肩滑块的破坏情况	159
9.4 与数值模拟成果的对比	160
9.4.1 坝踵开裂对比	160
9.4.2 坝趾破坏和不平衡力计算结果对比	161
9.5 试验主要结论	162
参考文献	163
第10章 有缝高拱坝的地质力学模型试验	164
10.1 概述	164
10.2 地质力学模型试验	165
10.2.1 模型试验设计	165
10.2.2 模型砌筑	166
10.2.3 坝体裂缝的模拟	167
10.2.4 模型试验装置	168
10.2.5 监测点布置	168
10.3 试验结果分析	171
10.3.1 应力分析	171
10.3.2 变位分析	172
10.3.3 内部观测分析	173
10.3.4 开裂破坏研究	174
10.4 试验主要结论	175
参考文献	175

附录A 变形加固理论简介	176
A.1 结构的稳定和失稳	176
A.2 高拱坝整体稳定性评价	178
A.3 变形加固理论的有限元表述及局部破坏评价	180
A.4 小结	181
参考文献	181

绪 论

1.1 地质力学模型试验的意义

1.1.1 地质力学模型试验

地质力学模型试验是基于一定的相似原理对特定的工程结构及赋存的地质环境进行缩尺研究的一种物理模拟方法^[1,2]。地质力学模型试验的研究对象是工程结构与周围的地质构造组成的统一的整体,主要目的是研究岩土工程结构在外荷载作用下的位移、应力、破坏过程和安全度等,以及结构和周围地质环境的相互作用、相互影响,为工程结构的加固处理提供依据,以保障结构的安全运行。

1.1.2 工程背景

目前,我国正在兴建或者已经完工的高拱坝大部分位于西南地区,如表 1.1 所示。该地区地形、地质条件复杂,河谷陡峻,断层发育,地震与地质灾害频发,使得高拱坝无论是设计、施工都存在很大的困难,其中的许多细节,都要进行深入的论证、研究,才能保证高拱坝工程的安全稳定。而我国现行的拱坝设计规范和水工设计手册,对于 200m 以上的高拱坝,均没有明确的规定^[3-5]。

表 1.1 我国已建、新建和设计中的部分 200m 以上高拱坝

水电枢纽	所在流域	状 态	坝高/m	库容/亿 m ³
大岗山	大渡河	在建	210.0	7.4
龙盘	金沙江	设计	296.0	374.0
白鹤滩	金沙江	设计	289.0	191.0
溪洛渡	金沙江	在建	285.5	46.5
小湾	澜沧江	已建	294.5	149.0

续表

水电枢纽	所在流域	状 态	坝高/m	库容/亿 m ³
拉西瓦	黄河	已建	250.0	10.8
乌东德	金沙江	设计	265.0	73.0
马吉	怒江	设计	290.0	31.8
松塔	怒江	设计	313.0	63.1
二滩	雅砻江	已建	240.0	58.0
锦屏一级	雅砻江	已建	305.0	77.6
构皮滩	乌江	已建	232.5	64.55

另外,在高拱坝工程建设中,伴随着高边坡和地下洞室的开挖,这些工程的稳定性也亟待关注。

1.1.3 地质力学模型试验的必要性

尽管随着计算机技术的飞速发展,大规模的三维数值模拟已经广泛应用到高拱坝、地下洞室等工程的整体稳定分析中,但是,由于数值方法本身的局限性,难以对拱坝开裂、岩体破坏等过程进行追踪仿真分析。同时,对地质构造中的节理、裂隙等,数值方法也难以进行有效模拟。地质力学模型试验能够弥补数值方法的不足,可以反映结构和地质构造的空间关系;既能对结构进行精确模拟,又能对节理、断层等地质构造进行近似模拟。对于大坝等结构的破坏全过程,能够直观地进行展现。从而使研究者更容易从整体上把握工程的整体稳定和变形趋势,掌握高拱坝及基础的薄弱环节,从而对坝型及基础的加固处理措施的设计做出相应的优化。

随着国内外高拱坝建设高度的不断增加,基础的稳定安全问题也日益突出。其涉及的问题不仅仅是复杂程度的增加,还涉及常规设计原则、方法及判据的实质性改进。这就需要从地质力学模型试验的角度,对数值模拟结果进行验证和分析。尤其是高拱坝整体作用机理方面,地质力学模型试验更是起着举足轻重的作用。因此,在当前我国高拱坝建设高潮时期,结合在建或者设计中的实际高拱坝工程,开展相应的地质力学模型试验研究,对于保障高拱坝的稳定及长期安全运行具有重要的科学及工程应用价值。

1.2 地质力学模型试验的研究现状

1.2.1 地质力学模型试验的发展

国外在 20 世纪 50 年代就开始将地质力学模型试验应用于拱坝的破坏研究。比较著名的工作是意大利贝加莫结构与模型试验研究所(Institute of Structure Model Experiment and Simulation,ISMES)用地质力学模型对包括 Almendra 和 Vajont 拱坝在内的大坝稳定性进行研究,并给出了很有意义的成果^[1]。在南斯拉夫的地质与基础工程学院进行的 Glen

Calvo 拱坝地质力学模型试验规模巨大,试验也十分成功。葡萄牙里斯本的土木工程国家实验室(Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC)也开展了包括 Cambambe 拱坝、Alto Lindoso 拱坝以及 Alqueva 拱坝在内的拱坝结构模型试验^[6-8]。1979 年在贝加莫结构与模型试验研究所召开的地质力学模型国际研讨会上,分别对地质力学模型试验的理论、技术及在大坝、边坡、洞室等工程领域的应用作了介绍。由于欧美国家水电开发趋于饱和,建坝高峰已过,它们基本不再开展拱坝的地质力学模型试验。目前,国外具有较大规模的大坝结构实验室的单位包括俄罗斯国家水工科学研究所、法国国家水工实验室和印度中央水利水电研究所等。

在 20 世纪 50 年代中后期,我国的科研单位就开展了地质力学模型试验研究。例如清华大学水利系自 1956 年在我国首次对广东流溪河拱坝进行结构试验以来,除进行模型材料研究外,还一直进行拱坝坝基和坝肩稳定性的模型试验研究,完成了国内龙羊峡重力拱坝模型试验及三维小块体地质力学模型试验,之后开展了包括二滩、李家峡、小湾^[9]、溪洛渡^[10]、白鹤滩^[11]、锦屏一级、杨房沟^[12]、大岗山^[13-15]拱坝在内的国内主要大型拱坝工程的模型试验,对大坝的整体稳定性和大坝的超载能力与破坏机理进行了系统的研究,对基础加固措施的实际效果进行了评价。相关的拱坝稳定和整体安全系数的研究成果被编入水利行业标准《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)和电力行业标准《混凝土拱坝设计规范》(DL/T 5436—2006)。近年来,针对当前高拱坝开展的三维地质力学模型试验研究,在试验规模、试验方法和试验技术方面均已取得了一批创新性的重要成果。

长江水利水电科学研究院一直很重视模型相似材料的研究,并为三峡、葛洲坝、隔河岩等工程做过大量的平面和三维地质力学模型试验,为这些工程的设计和施工提供了比较满意的实验成果,取得了重大工程效益^[16]。近年来研究院岩基所对构皮滩、锦屏一级高拱坝^[17]及三峡高边坡进行了试验研究,取得了很多成果。

四川大学采用变温相似材料进行强度储备试验法(降强法)对国内一些拱坝和高边坡进行了坝肩稳定的分析研究^[18]。变温相似材料的研究是交叉学科的渗透,是将高分子材料与传统的模型材料结合起来,即在模型材料中加入适量的高分子材料及胶结材料。试验中,通过升温的办法使得高分子材料逐步溶解,以模拟材料力学参数的减低。该方法已经应用于一些工程实践,如:溪洛渡拱坝、沙牌拱坝、小湾拱坝、锦屏一级高拱坝等^[18-20]。

近些年来,地质力学模型试验受到了以有限元为代表的数值模拟的挑战,但是地质力学模型试验可以真实地模拟复杂的地质构造,直观地反映模型从加载到完全破坏的全过程,有助于发现一些新的力学现象和规律,可以为建立新的理论和数学模型提供依据。这些使得地质力学模型试验始终作为一种不可替代的研究方法被广泛地应用于高拱坝坝肩稳定和加固分析。另外,拱坝地质力学模型试验和三维数值分析可相互补充、相互研究,两者结合能更好地研究工程结构破坏行为。因此,目前我国还有多家单位保留有实验室可进行大型坝工试验,主要有清华大学、长江水利水电科学研究院、四川大学、中国水利水电科学研究院、河海大学^[21]等。

1.2.2 高拱坝地质力学模型试验研究进展

地质力学模型试验从提出至今,在相似理论、相似材料、模型试验系统以及稳定性评价

方法上具有较大进步。

地质力学模型试验的基本理论是相似理论,即要求在试验过程中模型和原型的各物理量均需遵循一定的比例关系。目前地质力学模型试验中主要考虑物理量,如变形参数、强度参数,其相似比主要根据相似第一定理确定,即通过已知描述现象的物理方程确定各相似比之间的相互关系。这些已知的物理方程包括平衡方程式、线弹性本构方程、边界条件等。但由于岩石变形具有明显的非线性和时效性,相关的力学模型和数学模型的建立较为复杂,采用第一定理计算相似比不仅困难而且烦琐,因此目前广泛采用量纲分析法确定相似比关系,量纲分析法是以量纲方程为核心,以方程的齐次性为依据而进行的,其理论基础包括两个齐次方程的数学理论和相似第二定理,即白金汉(Buckingham)定理或者 π 定理。

模型相似材料是地质力学模型试验能否成功的关键。早期的模型相似材料大多用氧化物作为骨料(PbO 、 Pb_3O_4 、 ZnO),用环氧树脂等作为原料,目的是提高容重,保证强度和弹模,但因为这些种骨料有毒而逐渐淘汰。如果按照模型相似材料的骨料分类,目前重晶石粉类相似材料应用最多,金属类(铁粉、铜粉)和河沙类也运用较多。如果需要模拟岩石流变特性,还需要研究能模拟蠕变的相似材料,这无疑会增加相似材料研制的难度,目前国内已经有科研单位开展相关研究,并取得了一定成果。

模型试验系统主要包括加载系统、测量系统和监测系统等。

(1) 加载系统主要用于模拟拱坝所受的外荷载,主要是水荷载和泥沙荷载。水荷载和泥沙荷载目前主要采用油压加载法,这种加载方法可控性好,控制精度高;可以改变加压的大小和方向,并可完成联合的合成荷载模拟;可提供较大压力,满足超载破坏试验要求。除了油压加载,还可通过液压加载和气压加载法,但这两种方法已经逐渐不被采纳,只有在模拟如渗透压力等荷载时采用气压加载。

(2) 测量系统的作用是获得所需要的各种参量,并将其变成分析问题所依据的数据、图表或曲线。目前采用较多的是电测法。测量系统的核心是传感器和数据采集系统。因为信号采集设备的发展迅速,测量系统可以说是地质力学模型试验中发展最快的部分;国内外均有大型公司甚至是跨国公司研制生产高精度、高可靠性和高采集速率的数据采集系统,并且已经能基本实现实时采集、自动储存、可视化和数据分析的功能。

(3) 监测系统主要用于实时监测拱坝坝踵和坝趾裂缝开裂情况,主要由摄像头配合数据采集系统组成。监测系统近年来发展较快,且朝着微型化、自动化和高清晰度方向发展。

地质力学模型试验是三维静力结构破坏试验,其试验方法主要有3种:超载法、强度储备法(降强法)、超载与强度储备相结合的综合法。超载法主要考虑作用荷载和不确定性,通过超载水容重或者超水位两种方式得到拱坝的超载安全系数 K_p ,以研究结构承受超载作用的能力,这是目前运用较多的一种试验方法。强度储备法则主要考虑材料强度的不确定性和可能的弱化效应,采用 K_f 作为强度储备安全系数。试验时,要人为降低断层的力学参数,但是不能降低坝肩岩体全部的力学参数,而且很难通过单纯降低材料参数完成拱坝破坏试验,因此这种方法目前还处于探索阶段。综合法是强度储备与超载法的结合,试验一般是先超载后降强,得到综合安全系数 K 。评价拱坝整体稳定。

1.3 地质力学模型试验的发展趋势

根据国内外拱坝地质力学模型试验的方法和技术发展,以及与数值计算比较来看,目前模型试验还存在以下几个问题:

(1) 模拟比尺一般较小。目前对 300m 级的高拱坝一般只能做到 1:200,难以精细地模拟基础结构面对大坝破坏的影响;此外模拟比尺较小,相似材料的强度和弹模则更低,加大了相似材料配制的难度。

(2) 加载方式单一,很难考虑复杂地应力和基础多维应力状态。

(3) 目前进行的高拱坝模型试验一般都采用超载法和降强法,很难考虑温度和渗流对大坝及基础开裂和破坏过程的影响。

(4) 很难对拱坝运行及其开挖全过程进行模拟。

(5) 对大坝的破坏过程很难追踪,特别是上游坝踵的开裂监测跟踪。

可见,当前的高拱坝地质力学模型试验还有较大的发展潜力,在模拟技术和手段方面要适应新时代的发展,引进新的试验装置,使之更好、更全面、更真实模拟特高拱坝的开裂及基础破坏全过程。

将来地质力学模型试验的发展主要趋势如下:

(1) 为了更精细地模拟高拱坝基础中断层、夹层、节理和结构面,模拟比尺将向更大的比尺发展。如针对 300m 级别高拱坝最大采用 1:200 向 1:100 发展。这无疑对模型试验的试验场地、试验平台以及加载系统等提出更高的要求;同时砌筑模型的工作量也会大大增加,为此应该进一步改进试验试块制作、砌筑流程等,以提高效率,节约时间。

(2) 为了满足模拟工程岩体结构的多维受力特性,试验的加载方式也应该朝多维方向发展,并且随着伺服加载系统在土木、岩土结构试验中广泛应用,拱坝的加载系统也应该采用伺服控制,这样可以在加载过程中进行实时控制。目前,清华大学水工结构实验室已经研制了大型岩土多点伺服加载系统,以更好地模拟岩土结构的受力特性。

(3) 渗流对高拱坝开裂破坏影响较大,目前的试验较少考虑渗流对拱坝安全性的影响。地质力学模型试验的一个发展趋势就是引进新的加载设备和新的试验材料,以便能充分考虑渗流对大坝及坝基稳定的影响。

(4) 随着科技的发展,将实现模拟跟踪监测技术的现代化、智能化、可视化,如采用声发射技术监控开裂前兆,微型摄像系统监控上游坝踵开裂,以及内部光纤技术监控坝肩内部的变形形态等。这些新技术已经逐步应用于模型试验中。

(5) 随着我国大型高拱坝的建设高峰期已经过去,许多高拱坝即将进入运行期,在运行期拱坝的健康状态也会受到各种挑战。如何采用地质力学模型试验对拱坝运行期的长期稳定性进行评价是一个重要课题,目前国内外还没有任何一家科研单位对高拱坝长期稳定性进行过模型试验研究。结构长期稳定性模型试验必定要考虑岩石的时效变形,因此模型相似材料必须能反映岩石原型材料的流变性质。长期稳定性模型试验必须模拟长期的恒定静水压力、泥沙压力和山体自重的作用,因此需要采用伺服加载系统施加长期的、恒定的外荷载。目前,清华大学水利系已经开展了相关的研究工作。

总之,高拱坝地质力学模型试验正朝着大比尺、智能化、多学科交叉、精细化及时效性方

面发展。

参考文献

- [1] FUMAGALLI E. Statical and geomechanical models[M]. Springer, 1973.
- [2] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [3] SL 282—2003. 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [4] DL/T 5346—2006. 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 2007.
- [5] 周建平, 党林才. 水工设计手册第5卷混凝土坝[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [6] LEMOS J V. Modelling of arch dams on jointed rock foundations [C]//ISRM International Symposium-EUROCK 96. International Society for Rock Mechanics, 1996: 519-526.
- [7] LEMOS J V, PINA C A B, COSTA C P, et al. Experimental study of an arch dam on a jointed foundation[C]//8th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics, 1995: 1263-1266.
- [8] OLIVEIRA S, FARIA R. Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams[J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1430-1439.
- [9] 刘耀儒, 王俊, 杨强, 等. 小湾拱坝坝体裂缝对拱坝受力和稳定的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1132-1139.
- [10] LIU Y R, GUAN F H, YANG Q, et al. Geomechanical model test for stability analysis of high arch dam based on small blocks masonry technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2013, 61: 231-243.
- [11] 官福海, 刘耀儒, 杨强, 等. 白鹤滩高拱坝坝址锚固研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1323-1332.
- [12] 张泷, 刘耀儒, 杨强, 等. 杨房沟拱坝整体稳定性的三维非线性有限元分析与地质力学模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Supp 1): 239-246.
- [13] ZHANG L, LIU Y R, YANG Q. Evaluation of reinforcement and analysis of stability of a high-arch dam based on geomechanical model testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014.
- [14] 张泷, 刘耀儒, 杨强, 等. 基于地质力学模型试验的大岗山拱坝整体稳定分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1-12.
- [15] 张泷, 刘耀儒, 杨强, 等. 基于块体砌筑技术的大岗山高拱坝地质力学模型试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 53-62.
- [16] 沈泰, 邹竹荪. 地质力学模型材料研究和若干试验技术的探讨[J]. 长江科学院院报, 1988(4): 12-23.
- [17] 姜小兰, 陈进, 孙绍文, 等. 锦屏工程地质力学模型坝基岩体新型材料研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(6): 40-43.
- [18] 李朝国, 马衍泉, 胡成秋. 地质力学模型材料特性的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1988, 42(6): 1-14.
- [19] 杨宝全, 张林, 陈建叶, 等. 小湾高拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2086-2093.
- [20] CHEN Y, ZHANG L, YANG G X, et al. Anti-sliding stability of a gravity dam on complicated foundation with multiple structural planes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2012(55): 151-156.
- [21] 沈洪俊, 戴妙林, 杨成祝, 等. 江口双曲拱坝地质力学模型试验研究[J]. 水电站设计, 2004, 20(2): 93-99.