

高等学校水利水电工程系列教材

水工结构模型试验

徐青 李桂荣 编著



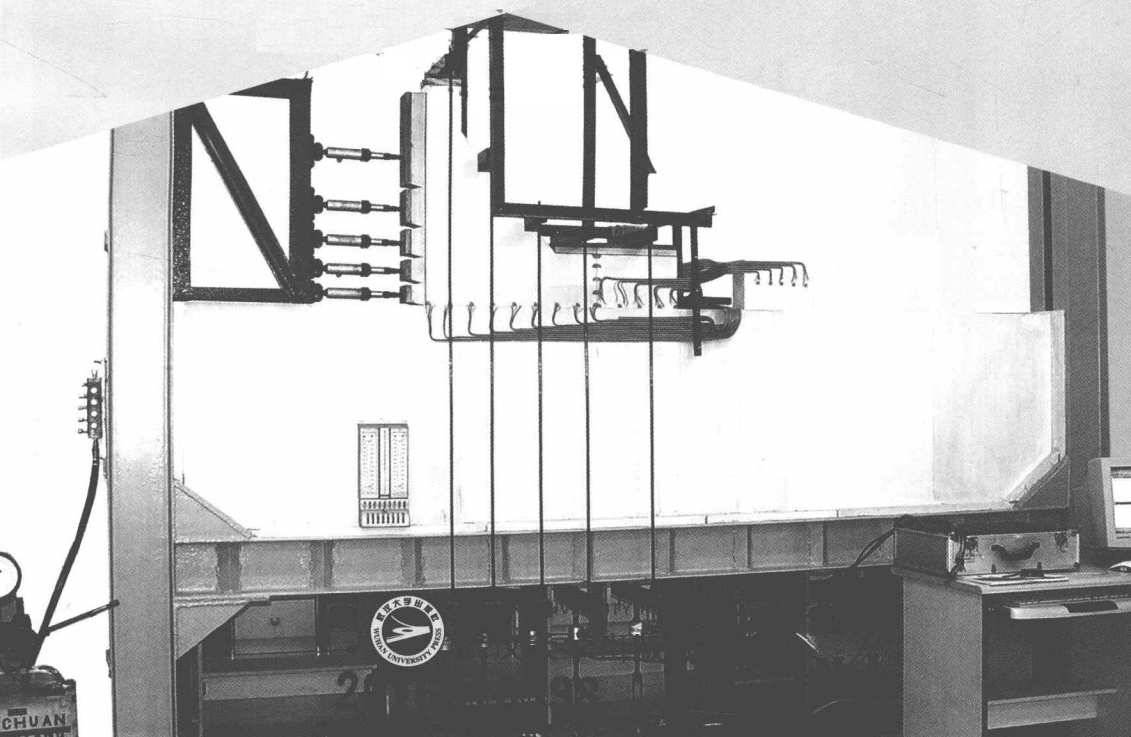
WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校水利水电工程系列教材

水工结构模型试验

徐青 李桂荣 编著



图书在版编目(CIP)数据

水工结构模型试验/徐青,李桂荣编著. —武汉:武汉大学出版社,
2015. 11

高等学校水利水电工程系列教材

ISBN 978-7-307-17149-7

I. 水… II. ①徐… ②李… III. 水工结构—水工模型试验—高等学校—教材 IV. TV32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 265165 号

责任编辑:鲍 玲 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张:12 字数:213 千字 插页:2

版次:2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17149-7 定价:26.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



图6.3 漫湾大坝模型 II

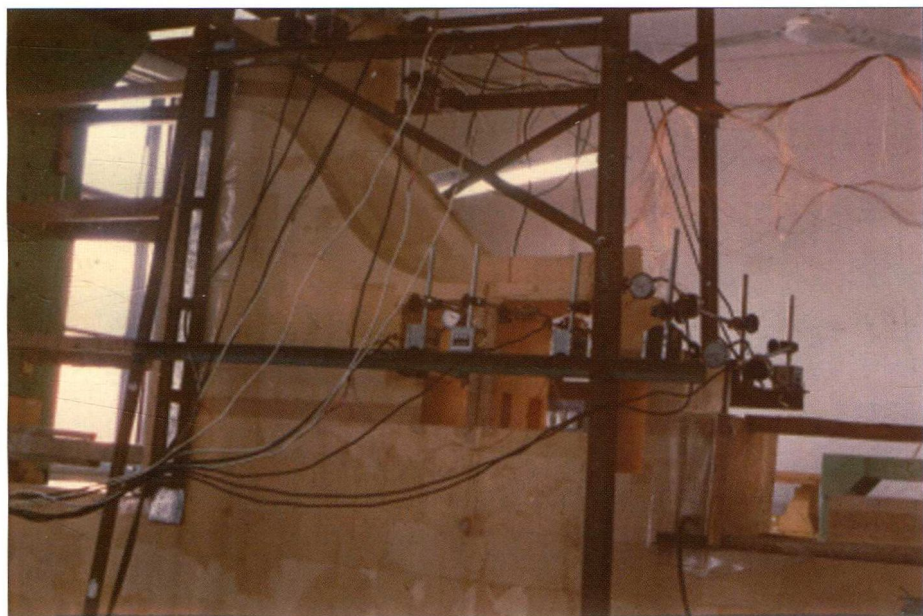


图6.6 模型试验监测系统

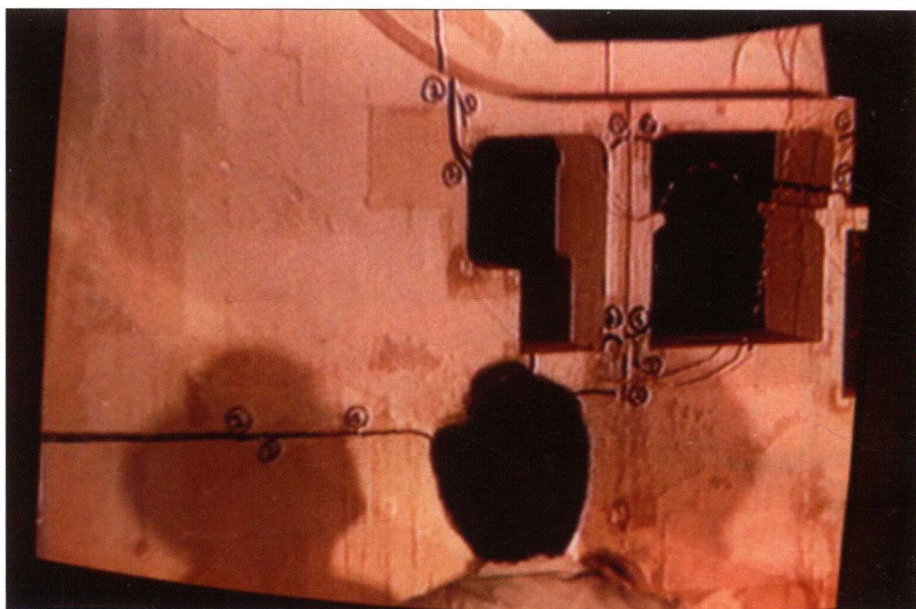


图6.17 模型Ⅱ裂缝分布



图6.18 模型Ⅱ最终破坏情形

前 言

结构模型试验、数值分析计算以及现场原型监测是研究水工建筑物应力应变及安全状态的三个主要手段。早期,由于计算手段的制约,水利水电工程中的结构设计主要依据经典结构分析及结构模型试验,了解其应力分布、变形状态以及基础稳定性等。20世纪中后期,由于计算机技术和数值分析理论的发展,数值分析方法在坝工设计中开始发挥重要作用,模型试验的重要性有所减弱。20世纪90年代以来,中国在西部深山峡谷中建设了一系列大型、特大型水利水电枢纽工程,常规的规程规范推荐的设计方法受到挑战,而数值分析结果也由于其参数、边界条件、环境因素等的不确定性,不足以作为结构设计的唯一分析手段。因此,目前我国对重大水利水电工程中的重要建筑物,除常规设计外,要求辅以数值分析及结构模型试验进行专题研究,这些成果相互验证,相互补充,以达到安全、经济、可行、绿色环保之目的。

在中国水工结构模型试验的发展历程中,高等院校及科研单位作出了巨大的贡献,原武汉水利电力学院(现武汉大学水利水电学院)无疑是这些高校中的杰出代表之一。自20世纪80年代起,在前辈老师吴沛寰教授的领导下,针对漫湾重力坝、宝珠寺重力坝以及东江拱坝等的地质力学模型试验任务,开展了一系列研究开发工作,如模型材料、加工成型设备、测试技术、自动化监测及数据处理系统等。在加工成型设备方面,1989年结合东江高混凝土拱坝地质力学模型试验,自行研制了各种不同型号的材料试验试件成型机。这些机械设备的应用,不仅有效提高了生产效率,而且保证了试件质量。在自动化监测及数据处理方面,20世纪80年代初,研制成功了DJS自动化监测及数据处理系统,并成功应用于宝珠寺大坝、东江大坝、漫湾大坝的结构模型试验中。之后又对DJS系统进行改进,更新和扩充发展了多通道高精度数据采集、处理与绘图系统,使整个结构更加紧凑,整个系统更具通用性和灵活性。

笔者从事水工结构工程设计、教学及科研等工作三十年,其中教学与科研工作亦逾十年,其间承担了水工结构模型试验教学指导工作。“水工结构模型试验”是“水工建筑物”的配套试验课程,形成了武汉大学水利水电学院的水工

教学特色。在教学过程中,笔者深知物理模型在工程结构设计理论的教学与研究工作中的重要性,也深感当前教学与研究工作中对物理模型试验重视程度的不足。本教材的写作目的一方面是为了满足学生试验课程学习的需要,另一方面更是作者的一份心愿:整理完善前辈的成果,纪念为水利工程结构模型试验兢兢业业作出贡献的前辈老师们,以免这些成果被人们逐渐淡忘、有价值的资料濒临遗失。

本书第1章主要介绍水工结构模型试验的发展历程、模型试验的目的和意义,以及存在的问题和发展趋势。第2章主要阐述水工结构模型试验的基本原理,重点介绍了线弹性静力学模型试验、脆性破坏模型试验、地质力学模型试验等的相似判据。第3章介绍模型材料,主要包括脆性弹性结构模型试验材料和地质力学模型试验材料。该章整理了吴沛寰教授研究小组结合东江、漫湾等大坝工程地质力学模型试验的研究成果,其中模型材料配比以及相应的材料力学特性、参数之间的经验公式、材料的适用条件等都是非常珍贵的第一手试验资料。第4章主要阐述了地质力学模型试验程序设计的重要性,并介绍了一些工程实例。第5章介绍了线弹性静力学模型试验,主要包括两部分:第一部分依托重力坝,用于培训学生从事结构模型试验的基本技能,内容涉及试验任务、试验目的、模型设计、试验装置及设备、试验流程、试验成果整理等;第二部分依托大水碾碾压混凝土坝,介绍实际工程三维模型试验方法及应用概况。第6章依托东江、漫湾等实际大坝工程介绍了地质力学模型试验,内容涉及模型设计、加载装置、超载方式、监测系统及测点布置、试验程序、试验成果及成果分析等。第7章简单介绍了水工结构渗流模型试验,主要包括相似模型材料渗透参数的测试,含复杂渗控系统渗流场的测定装置及方法等。

本书的出版得到了武汉大学水利水电学院的大力支持和出版资助;在本书的写作过程中,得到了作者研究团队的支持和鼓励;在本书的出版过程中,武汉大学出版社的编辑及相关工作人员付出了辛勤的劳动。在此作者一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限,纰漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

徐 青

2015年10月16日

于武汉东湖珞珈山

目 录

第1章 绪论	1
1.1 水工结构模型试验的目的和意义	2
1.2 水工结构模型试验的发展历程	4
1.3 水工结构模型试验存在的问题及发展趋势	7
第2章 水工结构模型试验的基本原理	10
2.1 线弹性静力学模型的相似判据	10
2.2 破坏模型的相似判据	14
2.3 地质力学模型的相似判据	17
2.4 钢筋混凝土结构模型的相似判据	18
2.5 坝体混凝土温度应力模型的相似判据	18
2.6 渗流模型的相似判据	21
第3章 模型材料	22
3.1 脆性材料结构模型试验	23
3.1.1 石膏及石膏混合料	23
3.1.2 水泥混合料	30
3.2 地质力学模型试验	32
3.2.1 浇筑类地质力学模型材料	35
3.2.2 压制类地质力学模型材料	57
3.3 岩体软弱结构面模型材料	63
第4章 模型试验程序设计	65
4.1 概述	65
4.2 试验程序影响因素	66
4.3 试验程序设计实例	68

4.3.1	瑞士 Emosson 双曲拱坝地质力学模型试验	68
4.3.2	智利 Rapel 拱坝地质力学模型试验	69
4.3.3	墨西哥 Itzanton 双曲拱坝地质力学模型试验	69
4.3.4	中国龙羊峡拱坝坝肩地质力学模型试验	71
4.3.5	中国隔河岩拱坝整体地质力学模型试验	71
4.3.6	中国东江拱坝地质力学模型试验	72
4.4	试验程序设计的原则及建议	74
第5章 线弹性静力学模型试验		76
5.1	混凝土重力坝结构模型试验	76
5.1.1	试验任务	76
5.1.2	试验目的	76
5.1.3	模型设计	76
5.1.4	试验装置及设备	78
5.1.5	试验步骤	83
5.1.6	成果整理	89
5.1.7	主要设备的工作原理	89
5.2	大花水碾压混凝土坝物理模型试验	92
5.2.1	工程概况	92
5.2.2	试验目的及步骤	94
5.2.3	模型设计与制作	95
5.2.4	测点布置	96
5.2.5	加载设计	100
5.2.6	试验成果及分析	104
第6章 地质力学模型试验		112
6.1	漫湾水电站混凝土重力坝地质力学模型试验	112
6.1.1	工程概况	112
6.1.2	试验任务	115
6.1.3	模型设计	115
6.1.4	加载装置及超载方式	117
6.1.5	监测系统及测点布置	119
6.1.6	试验程序	119

6.1.7 试验成果及分析	119
6.2 东江水电站混凝土拱坝地质力学模型试验	131
6.2.1 工程概况	131
6.2.2 试验任务	132
6.2.3 模型设计	133
6.2.4 加载系统及超载方式	142
6.2.5 监测系统及测点布置	142
6.2.6 试验程序	146
6.2.7 试验成果及分析	147
第7章 水工结构渗流模型试验	174
7.1 材料渗透特性试验	175
7.1.1 试验目的	175
7.1.2 渗透系数测定	175
7.2 拱坝渗流模型试验	177
7.2.1 试验目的	177
7.2.2 试验内容	177
7.2.3 模型设计与制作	178
7.2.4 试验步骤	183
参考文献	184

第1章 绪 论

水利水电枢纽工程是由不同类型、不同功能的水工建筑物构成的综合体,其中挡水建筑物、泄水建筑物、发电厂房等是枢纽的主要建筑物。水工建筑物在自重、水荷载以及各类环境因素(如地质构造作用、水文地质作用、温度作用、化学作用、地震作用等)的作用下,其应力场、温度场、渗流场以及化学场等均将发生改变,当这种改变使建筑物的变形和应力达到一定程度时,便会发生破坏。目前,分析水工建筑物作用效应及其安全性的方法主要有三类:物理模型试验、数值分析以及现场原型监测。

(1) 物理模型试验

物理模型试验是以实验力学和相似理论为基础,建立物理模型,研究建筑物在各种荷载及环境因素作用下的应力、变形状态以及屈服、开裂等过程。物理模型试验由模型、加载系统、量测系统以及计算机控制系统等组成。模型试验可以模拟建筑物及其地基的实际工作状态,同时考虑多种因素及复杂的边界条件,不仅可以直观地揭示建筑物在外部因素作用下的变化过程,而且可以为建立和验证数学模型、开展数值分析提供可靠的依据。

(2) 数值分析

数值分析是以数学和力学为基础,根据水工建筑物的结构特点和受力条件,构建数学物理方程,建立数学模型,在一定的初始条件和边界条件下,研究结构的应力和变形状态。通常的数值分析方法有:有限单元法、有限差分法、边界元法、不连续变形分析法、离散单元法、块体单元法、复合单元法、数值流形法、无单元法等。

(3) 现场原型监测

现场原型监测是通过对水工建筑物中埋设仪器设备,对建筑物的实际运行状态进行动态监测,并以监测资料为基础,分析建筑物的工作性态,从而达到对建筑物进行实时安全监控的目的。水工建筑物现场原型监测主要包括监测仪器、监测设计、监测施工、监测数据采集、监测资料整理分析、安全评价及安全监控等。

随着计算机技术的发展,数值分析方法得到了广泛的应用。但是由于水工建筑物自身结构、受力条件、边界条件、基岩地质构造以及环境因素等都极其复杂,数值结果往往需要建立在一些假定的基础之上,这就使得数值模拟受到很大制约;同时,一些复杂结构或复杂水力条件下的水工建筑物,其相关物理量之间尚未建立起合理的函数关系,这就使得数值分析难以开展。因此假设条件及函数关系的合理性,只能通过室内模型试验或现场监测进行验证,尤其是大型或重要的水利水电工程项目,在开展数值分析的同时,还要求开展模型试验研究,验证数值分析结果的合理性和可靠性。

现场原型监测本质上就是1:1的物理模型试验。近年来,随着现场监测技术的进步,模型试验成果、数值分析成果以及现场监测数据之间的相互验证变得越来越重要。

20世纪90年代以来,中国在西部水电大开发过程中,建设了一系列大型、特大型水电枢纽工程,黄河、红水河、大渡河、澜沧江、乌江、金沙江、雅砻江、大渡河等13个大型水电基地正在全面开发建设。混凝土浇筑量约2800万立方米的三峡重力坝,世界上第一座300m级的小湾混凝土双曲拱坝和坝高305m的锦屏一级混凝土双曲拱坝等已经建成发电,金沙江水电基地下游河段四大世界级巨型水电站——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝(乌东德,混凝土双曲拱坝,设计坝高270m;白鹤滩,混凝土双曲拱坝,设计坝高289m;溪洛渡,世界泄洪量最大的混凝土双曲拱坝,设计坝高285.5m;向家坝,混凝土重力坝,设计坝高162m),以及设计坝高314m的双江口心墙堆石坝等,都正在建设中。水利水电工程已成为国民经济的重要基础设施,在经济建设和维持社会安定中起着举足轻重的作用。这些高库大坝建设在深山峡谷中,地质构造复杂,常规的设计原则、方法、经验等受到挑战,如在小湾高拱坝设计和建设过程中,遇到很多超出人们现有认知水平、没有规程规范可循的关键技术问题,在这种情况下,地质力学模型试验等一系列的模型试验研究工作就显得尤为重要。

对于重要工程,数值分析必须结合模型试验以及现场监测数据,综合分析,才能使数值分析成果有据可信。

1.1 水工结构模型试验的目的和意义

水工建筑物的结构模型试验,就是遵照一定的相似准则,将原型的几何形态、材料特性、受力条件、环境因素等在模型上反映,通过各种测试手段,记

录模型试验过程中出现的物理现象,得到相应的物理量值,并进行分析研究。由于模型试验能同时考虑多种因素,模拟各种复杂的边界条件,直观了解试验过程中各物理量的变化规律,展现结构的屈服、开裂、破坏随时间的变化过程,了解结构的受力变形性状、薄弱部位、破坏模式等,从而研究结构的工作状态、性能衰变过程以及破坏机理,为施工、设计以及运行管理提供科学依据。因此,模型试验在工程设计和科学研究中具有十分重要的地位,是数值分析成果的重要补充与验证。

水工结构模型试验的目的和意义,可以归纳为以下几个方面:

- ①建立新的理论体系或方法。
- ②验证已建立的理论方法中采用的一些假定,确定其适用条件,并研究参数的合理取值范围。
- ③创立经验公式,验证经验公式的可靠性、适用条件及参数取值等问题。
- ④验证为开展数值分析编制的程序、采用的假定和简化条件,以及计算成果等的可靠性、合理性和适用性。
- ⑤验证实际工程结构的设计强度及安全度等,预测建筑物的衰变及破坏过程,研究结构的破坏机理,评价水工建筑物抵御事故的能力及运行寿命。
- ⑥创造新型结构,研究新型结构的性能及适用条件。
- ⑦发现新型材料,推动材料科学研究与工程应用研究的有效结合与相互促进。

水利水电工程对国民经济的巨大效益是众所周知的,然而它的失事所造成的危害更是十分严重的。世界上已经建造了很多水利水电工程,给人类带来了巨大的社会效益和经济效益,但也曾发生过多起重大失事事故,造成了生命和财产的巨大损失。惨痛的教训已使人们逐渐认识到了解并掌握水工建筑物的运行状态、劣化开始及发展过程,直至破坏的预测研究的重要性。因此,国内外对重要的水工建筑物都会开展物理模型试验研究,预测原型在运行过程中可能出现的一些重要物理现象,观察模型在意外情况下可能发生的破坏过程,通过一系列工程的模型破坏试验,研究结构的薄弱环节,从而改进结构设计,为结构安全度分析及优化设计提供依据,确保工程安全。

水工建筑物修建在岩体上,所涉及的地质因素复杂,又要考虑水的作用,因此比一般的工业与民用建筑要复杂得多。尽管计算机技术、数值分析理论和方法(如有限单元法等)已经有了迅速的发展和广泛的应用,但是目前还不可能在所有方面都获得精确的理论解,也不可能对所有复杂的物理现象都写出数学表达式。物理模型有可能使原型各方面的特性得到较为全面和合理的模拟,

从而使物理模型试验成果成为理论计算和数值分析成果的重要校核与补充。因此,国内外在大型的和重要的水工建筑物设计施工过程中,都同时要求进行数值计算分析和模型试验分析,以期达到相互验证的目的。

由于物理模型是对实际结构性态的模拟,在模型上还有可能出现预先未知而又实际存在的某些现象,因此,模型试验研究不仅仅是对数值分析方法的验证,而且是获得更丰富更符合实际信息的积极探索。

综上所述,水工结构模型试验的目的和意义就是探索并发展新理论、新材料、新技术、新工艺,提高对水工建筑物设计、施工及运行全过程的认知,保证水利水电工程的安全性和经济性。

需要指出的是,模型试验是伴随着数学力学分析理论、材料科学、计算机技术、实验技术和工艺等多学科的进步而发展的,模型试验也很难完全做到真实反映原型,模型材料、模拟方法和测试技术等也有待提高和发展。同时,模型试验需花费较多的人力和财力,经历较长的时间周期,没有数值模拟灵活方便。因此,模型试验有它的局限性,模型试验和数值分析是相辅相成、相互验证补充和发展的关系,不能相互取代。

1.2 水工结构模型试验的发展历程

水工结构模型试验通常包括线弹性静力学模型试验、脆性破坏模型试验、地质力学模型试验、温度应力模型试验、水工水力学模型试验以及地下工程结构模型试验等。

早在18世纪初,欧美一些国家已建立起水工试验室,开展水工、河工、港工、船舶、水力机械等方面的模型试验研究。20世纪初期开始运用模型试验方法,对水工建筑物进行结构分析。

1906年,美国威尔逊(J. S. Wilson)用橡皮材料制作重力坝断面模型,进行结构模型试验;1930年,美国垦务局采用石膏硅藻土制作胡佛重力拱坝(Hoover dam)模型,进行山岩压力等试验研究。

20世纪20年代,法国、意大利开始进行水工结构模型试验,当时主要采用机械式引伸计进行应变测量。30年代初,电阻应变片问世,并逐步在结构模型试验中得到应用,为试验的发展和推广创造了有利条件。

20世纪三四十年代,模型模拟理论与试验技术得到发展,使得水工结构二维和三维模型试验得到了很好的理论和技术支持。

20世纪中期,坝工建设迅速发展,模型材料、试验技术等方面取得突破,

使结构模型试验研究领域的深度和广度都得到进一步发展,静力学试验、破坏试验以及地质力学模型试验都成为可能。1947年,葡萄牙里斯本建立国家土木工程研究所(LNEC),其特点是制作小比例尺模型,一般为 $1:200 \sim 1:500$,该研究所是小比例尺结构模型试验的著名代表。1951年,意大利建立了著名的贝加莫(Bergamo)结构模型试验所(ISMES),该所进行了大量的结构模型试验研究,其特点是采用大比例尺模型,一般为 $1:20 \sim 1:80$,该试验室是大比例尺结构模型试验的著名代表。在此期间,许多国家(如法国、德国、英国、西班牙、前南斯拉夫、前苏联、澳大利亚、日本、中国等)相继开展了模型试验工作,并多次举行国际性的学术讨论会。例如,1959年6月在马德里举行的结构模型国际讨论会,全面讨论了结构模型的相似理论、试验技术及其实际应用。1963年10月在里斯本举行的混凝土坝模型讨论会,对混凝土坝的结构模型试验技术,包括破坏试验和温度应力试验等有关问题进行了讨论,其后又多次组织专题讨论会。1967年,第九届国际大坝会议,以及同年举行的国际岩体力学会议,提出了模型试验中用块体组合来模拟多裂隙介质岩体的设想等。

20世纪70年代初,结构模型试验进入新的发展阶段,地质力学模型试验得到广泛应用。地质力学模型试验的开展,扩大了结构模型试验研究的领域,使其可用于研究坝体和坝基的联合作用、重力坝的坝基抗滑稳定、拱坝的坝肩稳定、地下洞室围岩的稳定等问题。ISMES的富马加利(E. Fumagali)教授等人对地质力学模型材料进行了不少开创性的研究工作。1970年第二届国际岩体力学会议,巴顿(N. R. Barton)作了有关低强度地质力学模型材料的报告。ISMES首次成功进行了拱坝坝肩稳定小块体地质力学模型试验。前南斯拉夫地质与基础工程学院,进行了格兰卡尔沃特拱坝(Grancarevo Arch Dam)的地质力学模型试验,其模块数量达到10万块以上。葡萄牙等国也相继开始了地质力学模型试验研究工作。1979年3月,地质力学物理模型国际讨论会在意大利贝加莫召开,会议讨论了地质力学模型的试验理论、试验技术及其在大坝、边坡、洞室等工程领域的实际应用问题。中国在20世纪70年代中后期开始地质力学模型试验研究。在此期间,计算理论和计算机技术也取得了巨大成就,数值计算开始应用于结构受力分析,结构模型试验的重点便转向解决一些重大和复杂的工程问题。

中国于20世纪30年代初,在德国进行了黄河治导工程模型试验,并开始酝酿引进西方水工模型试验技术,筹建国内水工试验室。1933年,天津建立了中国第一个水工试验所;1934年,清华大学成立了水力试验馆;1935年,

在南京筹建了中央水工试验所,后更名为南京水力试验处;之后,全国建立了更多的水工模型试验研究机构。

20世纪50年代,中国兴建了一批混凝土坝。为了研究大坝的水力特性、解决混凝土坝特别是拱坝的应力分析问题,1956年,清华大学成立了中国第一个水工结构试验室。广东流溪河拱坝(坝高78m)试验是我国第一个混凝土坝的结构模型试验,在清华大学水工结构试验室进行,主要研究大坝的水力特性,多个单位的科研技术人员参加了这一试验研究工作。同年,中国水利水电科学研究院建立了结构模型试验室。此后,更多的水利水电科研单位和高等院校相继建立了模型试验室,开展结构模型试验研究工作。50年代末期,还进行过大头坝、蜗壳等结构的模型试验。试验工作开展初期以线弹性应力模型试验为主,之后开始进行模型破坏试验,以及地质力学模型试验。

20世纪60年代,模型试验中开始模拟坝基地质构造。中国水利水电科学研究院进行了拱坝和宽缝重力坝的结构模型破坏试验,清华大学开展了青石岭拱坝地质力学模型试验等。

20世纪70年代,中国兴建了一批砌石拱坝,为了配合工程设计,进行了砌石拱坝结构模型试验,以及拱坝坝肩抗滑稳定模型试验。在混凝土重力坝结构模型试验方面,多以研究有软弱夹层的坝基抗滑稳定及软弱坝基对坝体应力的影响为主。1972年,华北水利水电学院(现华北水利水电大学)结合朱庄、双牌、大黑汀等工程,利用结构模型进行了具有软弱夹层的岩基重力坝抗滑稳定试验研究。此外,华东水利学院(现河海大学)结合新安江、陈村和安砂等工程,开展纵缝对混凝土重力坝工作性态影响的试验研究。20世纪70年代中期,安徽省水利科学研究所丰乐双曲拱坝结构模型试验中进行了坝体表面和坝基内部应变的测量工作。70年代后期,长江水利水电科学研究院开始进行地质力学模型材料的试验研究,并且开展了平面地质力学模型试验。

20世纪80年代,武汉水利电力大学、清华大学等开始进行高拱坝三维地质力学模型试验。

进入21世纪,中国高拱坝建设蓬勃开展,由于对高拱坝特性的认识超出了人们的认知,因此,地质力学模型试验得到重视,并广泛开展起来。

在中国模型试验的发展进程中,高等院校及科研单位作出了巨大的贡献。

清华大学相继开展了流溪河、响洪甸、青石岭、紧水滩、东风、渔子溪、陈村、凤滩、铜头、安康、牛路岭、新丰江、龙羊峡、东江、二滩、李家峡、江垭、小湾、溪洛渡、锦屏一级、拉西瓦、薯沙溪等大坝结构模型及地质力学模型试验。

四川大学也做了许多坝工结构模型试验,提出了采用变温相似材料进行强度储备试验的新方法。该方法在模型材料中加入适量的高分子材料及胶结材料,同时配置温度变化系统,在试验过程中通过升温的办法使高分子材料逐步熔解,材料的力学参数就逐步降低,从而可以在一个模型上实现强度储备与超载相结合的综合法试验。这一方法已应用于溪洛渡、沙牌、铜头、百色、锦屏一级等大坝模型试验中。

原武汉水利电力学院(现武汉大学水利水电学院)自20世纪80年代起,开展了一系列结构模型试验和地质力学模型试验。

1988年,开展了漫湾水电站混凝土重力坝地质力学模型试验,对河床溢流坝段进行超载破坏试验,追踪裂缝开展及分布,了解破坏过程,确定超载安全系数。

1990年,开展了东江水电站混凝土拱坝地质力学模型试验,进行了正常工况下整体结构模型试验、拱坝局部加厚断面形状改变后的整体结构模型试验,以及坝踵F3断层对拱坝影响研究的整体结构模型试验。之后,为了进一步研究拱坝的承载能力及其破坏机理,又针对竣工后的拱坝进行了三维地质力学模型的超载破坏试验。同时,为了能够真实反映工程竣工后的实际情况,模型按实际体积力精确模拟了基岩及混凝土自重,并模拟了坝后4条发电背管及镇墩。

1992年,分两个阶段开展了宝珠寺水电站厂-坝三维地质力学模型试验研究。第一阶段研究厂-坝联合作用下,基础面的应力及变形,厂坝接缝面的传力作用,以及不同并缝高程的联合作用效果;第二阶段进行了地质力学模型破坏试验,分析厂-坝联合作用下,低并缝方案的极限承载能力、薄弱部位及超载情况下的破坏机理。

2007年,开展了大花水碾压混凝土坝结构模型试验,研究诱导缝和周边缝对拱坝坝体应力、应变的影响规律。

武汉大学水利水电学院还针对三峡、瀑布沟、景洪等水电站蜗壳及其外围钢筋混凝土结构开展了多项模型试验研究。

1.3 水工结构模型试验存在的问题及发展趋势

近年来,随着我国在复杂地质条件下高坝建设如火如荼地开展,地质力学模型试验出现了加快发展的势头,也因此对模型设计、模型材料、加载技术、试验量测设备等方面都提出了更高的要求。新型模型材料的发现、复杂多因素